ISSN : 2311-5122

7universum.com

UNIVERSUM: ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

11(152)

150 ЛЕТ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ
24 ноября 2026 г.

КРЯЧКОВ АНДРЕЙ ДМИТРИЕВИЧ 1876-1950 гг.

РУССКИЙ АРХИТЕКТОР

[illegible]риевич Крячко́в (24 ноября [6 декабря] 1876, [illegible]езд, Ярославская губерния — 25 августа 1950, Сочи, [illegible]кий край) — русский и советский архитектор [illegible]ский инженер) и преподаватель, доктор технических наук [illegible]), заслуженный деятель науки и техники РСФСР (1944). По проектам А. Д. Крячкова построено около 100 крупных зданий и сооружений в городах Сибири, многие из которых являются памятниками истории и культуры федерального и местного значения.

Андрей Крячков родился 24 ноября (6 декабря) 1876 года или 7 (19) декабря 1876 года[4] (в автобиографии — 1879 года[5]) в семье крестьянина Дмитрия Иосифовича Крячкова в небольшой деревне Вахрево[сн 1][сн 2] Ивановской волости Ростовского уезда Ярославской губернии, ныне деревня не существует, территория входит в Борисоглебское сельское поселение Борисоглебского района Ярославской областиь.

Потеряв отца в шестилетнем возрасте, был взят на попечение дедом, работал у него в крестьянском хозяйстве. В 1888 году окончил трёхлетнюю школу в селе Ильинском на Белыни и в том же году был отправлен родственниками к дяде в город Выборг, который устроил племянника «мальчиком» в контору табачной фабрики. Для подготовки к «конторской работе» в 1890 году Андрея определили в Выборгское реальное училище, где среди прочих предметов он изучал шведский и финский языки, к которым проявлял способности; в сентябре 1896 года получил аттестат об окончании училища.

В 1897 году поступил в Институт гражданских инженеров императора Николая I. Во время обучения проходил практику в Поволжье, Крыму, Выборге и в Закавказье (Карс, Тифлис), служил в Санкт-Петербургской городской управе, работал помощником архитекторов Н. В. Дмитриева и Ф. С. Харламова; на последних трёх курсах получал «казённую стипендию», вследствие чего по окончании института должен был прослужить три года в одном из губернских Строительных отделений. Окончил ПИГИ в 1902 году по I разряду с присвоением звания гражданского инженера и производством в чин коллежского секретаря со старшинством[9][10][11].

Из 69-ти предложенных институтом вакансий, Крячков выбр[illegible] Строительное отделение Томского губернского правлени[illegible] куда и поступил в сентябре 1902 года на должность младшего инженера, в том же году временно исполнял обязанности губернского архитектора. Служил младшим инженером до ноября 1903 года, занимался составлением различных смет и проектов, [illegible] наблюдением за постройкой и ремонтом казенных [illegible] году Совет Томского Технологического института [illegible] преподавателем архитектурного проектирования [illegible] инженерно-строительном и механическом [illegible] 1903—1905 годах работал помощником [illegible] сибирского учебного округа [illegible] по постройке зданий Т[illegible] института[10][12][13].

В ноябр[illegible]

7universum.com
UNIVERSUM:
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

UNIVERSUM: ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Научный журнал

Издается ежемесячно с ноября 2013 года

Выпуск: 11(152)

Ноябрь 2026 г.

Новосибирск
2026

ББК 3
U55

Главный редактор журнала:
Звездина Марина Юрьевна – д-р физ.-мат. наук, доц.

Редакционная коллегия:
Абдуллин Тимур Зуфарович – канд. техн. наук;
Гасумов Рамиз Алиевич – д-р техн. наук, проф.;
Деев Владислав Борисович – д-р техн. наук, проф.;
Кокшаров Сергей Александрович – д-р техн. наук, проф.;
Колесников Александр Сергеевич – канд. техн. наук;
Мажидов Кахрамон Халимович – д-р хим. наук, проф.;
Манасян Сергей Керопович – д-р техн. наук, проф.;
Мартышкин Алексей Иванович – канд. техн. наук, доц.;
Мерганов Аваз Мирсултанович – канд. техн. наук (PhD);
Немирова Любовь Федоровна – канд. техн. наук, доц.;
Полтавец Валерий Васильевич – д-р техн. наук, доц.;
Радкевич Мария Викторовна – д-р техн. наук, проф.;
Старченко Ирина Борисовна – д-р техн. наук, проф.;
Тимухина Елена Николаевна – д-р техн. наук, проф.;
Усманов Хайрулла Сайдуллаевич – д-р техн. наук, проф.;
Фозилов Садриддин Файзуллаевич – д-р техн. наук, проф.;
Шайтура Сергей Владимирович – канд. техн. наук, доц.;
Яронова Наталья Валерьевна – канд. техн. наук, доц.

U55 Universum: технические науки : электронный научный журнал. — № 11(152). — Новосибирск : Изд-во «Юниверсум», 2026. — 1060 с. — Текст : электронный. — URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/category/11152 (дата публикации: 28.11.2026).

ISSN 2311-5122
DOI: 10.32743/UniTech.2026.152.11
Учредитель и издатель: ООО «Юниверсум»
© ООО «Юниверсум», 2026 г.

Содержание

Статьи на русском языке

Информационные и цифровые технологии

Информатика, вычислительная техника и управление

Многокритериальный выбор классов программных решений для подбора исполнителей студенческих проектов 14
Гурьянова Ирина Владимировна
Путивцева Наталья Павловна
Зайцева Татьяна Валентиновна

Разработка и апробация модульно-конфигурируемой архитектурной модели формирования семейства вариативных мобильных приложений на основе единого MVVM-ядра 28
Панюшкин Андрей Михайлович
Слесарев Роман Александрович

Частичная репликация данных при обработке интенсивных потоков запросов к html/xml серверу ООСУБД НИКА 40
Тищенко Владимир Александрович

Искусственный интеллект и интеллектуальные системы

Методика адаптивной маршрутизации запросов между рекомендательной моделью и языковым агентом с учётом качества и вычислительных затрат 49
Баринов Константин Вячеславович

Электроника, приборостроение и радиотехника

Оптимизация радиоресурсов с учетом помех для устройств интернета вещей в гетерогенных сетях 5G 61
Ахунов Ашраф Абдухафиз угли
Исломов Равшан Туйчиевич

Промышленность и производство

Химические технологии и химическая промышленность

Энергосберегающая микронизация нефтяного кокса в двухроторном конусно-зубчатом гравитационном классификаторе: экспериментальная оценка и сравнение с роторными воздушными классификаторами 76
Абдуназаров Фахриддин Абдурашитович
Саддиков Фатхиддин Бурхониддинович
Отамирзаев Самаджон Олимжон угли
Умаров Фахриддин Шаробиддинович

Исследование магнийсодержащего осадка, полученного из рапы Караумбетского соляного месторождения при обработке карбонатом натрия 95
Жугинисов Бердах Байрамбаевич
Реймов Ахмед Мамбеткаримович
Эркаев Актам Улашевич
Кошанова Бибигул Турганбаевна

Диаграмма растворимости системы $MNSO_4$–$MNCL_2$–H_2O 105
Исакова Ойгул Мадаминжоновна
Кучаров Байрам Хайриевич
Тураев Зокиржон
Улашова Нафиса Актам кизи

Оценка качества отработанного подсолнечного масла как потенциального сырья для производства биодизеля 114
Исаматова Джамиля Нигматуллаевна
Исмаилов Ойбек Юлибаевич

Влияние механоактивированного гранодиорита на свойства композиционных портландцементов 124
Кабулова Лола Балтамуратовна
Оразимбетова Гулистан Жаксиликовна
Айимбетов Максетбай Жолибаевич

Определение химико-минералогического состава и структуры бентонитовой глины Ходжейлийского месторождения Каракалпакстана 136
Кадырова Зулайхо Раимовна
Пирниязова Назира Султаниязовна
Хожаметова Бийбимарям Кайповна

Исследование процессов обогащения базальтов методом механической очистки от шламов 146
Камолов Бўри Сирожович

Адсорбция красителя метиленового голубого магнитным углеродным сорбентом, полученным методом одностадийного синтеза из лузги подсолнечника 153
Карабаева Муслима Ифтихоровна
Салиханова Дилноза Саидакбаровна
Мирсалимова Саодат Рахматжановна
Махмудова Гулбахор

Оценка влияния гранулометрического состава и пористости на кучное выщелачивание бедных урановых руд 162
Нурбоев Кувондик Мирзанович
Мустафоев Муталжон Амруллоевич
Аллаберганова Гульчехра Машариповна
Музафаров Амрулло Мустафоевич

Применение методики SCAMPER в преподавании технических дисциплин (на примере пластинчатого теплообменника) 173
Рейпназарова Зинахан Даулетназаровна

Получение микрокристаллической целлюлозы из хлопкового линта и сравнение с другим растительным сырьём 182
Сайдалиев Кодиржон Косимжонович
Муслимова Индира Махамат Марселевна

Влияние концентрации гидроксида натрия и температуры абсорбции сероводорода на распределение фаз при получении сульфида натрия 191
Самадов Фаррух Хамзаевич
Эркаев Актам Улашевич
Хакимов Саид Сувонович
Вафоев Мухаммадали Мирзоевич
Бобокулов Акбар Носирович
Кошанова Бибигул Турганбаевна
Туракулов Бехзод Бегматович
Эркаева Назокат Актамовна
Турсунова Дилдора Абдусатторовна

Очистка дымовых газов кирпичных производственных предприятий от вредных примесей с помощью абсорберной установки 203
Фазлитдинов Жахонгир Равшанович
Шарипов Нодиржон Замирович
Нарзиев Мирзо Саидович

Влияние микрокальцита на структуру и кинетику водопоглощения композиции фрикционного назначения 210
Хайдаров Ильхом Юсупович
Юлдашов Диканбай Янгибаевич
Рахимов Хуршид Юлдашович
Нормуродов Анвар Азамат Ўғли

Оценка зубных паст по показателю относительной абразивности по дентину (RDA) и совершенствование их классификации в ТН ВЭД республики Узбекистан 220
Хамдамова Лобар Рустам кизи
Хамракулов Махмуджон Гафурджанович

Термический анализ огнезащитных покрытий на основе жидкого стекла для древесных материалов до и после огневого воздействия 234
Холикулов Шохрух Пирнафас угли
Нуркулов Файзулла Нурмуминович
Джалилов Абдулахат Турапович

Адсорбционно-коагуляционная комплексная очистка сточных вод нефте и газоперерабатывающих предприятий 245
Ширинов Гайратжон Кодиржонович
Назаров Сайфулла Ибодуллоевич

Разработка технологии получения комплексных составов для очистки минеральных солевых отложений с использованием местного сырья 254
Эшонкулов Нурбек Кахрамон угли
Абсалямова Гульноза Маматкуловна
Жураев Шохрух
Мураталиева Насиба Хайдаровна

Исследование влияния содержания наполнителей на механические свойства композиционных материалов на основе полипропилена 263
Юсупова Собира Юнус кизи
Камалова Дилнавоз Ихтиёровна
Негматов Сойибжон Содикович

Нефтяная и газовая промышленность. Переработка углеводородного сырья

Применение композиционного реагента КХР-Д в минерализованных буровых растворах для предупреждения сальникообразования 273
Хайдаров Ислом Косимович
Жураев Анвар

Металлургия, материаловедение и горное дело

Влияние продолжительности механического легирования на структуру и уплотнение твердого сплава WC–6FeCrNiWMo с высокоэнтропийной связкой при искровом плазменном спекании 279
Асадова Маржона Акмал кизи
Каюмов Баходир Бабакул угли
Бозоров Аминжон Нуриллоевич

Контейнерный модуль для доизвлечения золота из лежалых хвостов Тырнаузского месторождения: технологическое обоснование и материальный баланс 292
Бекбулатов Амир Дамирович
Куренков Дмитрий Сергеевич

Пространственная связь деформаций земной поверхности по данным InSAR с подземными очистными блоками и воронками проседания на Хандизинском полиметаллическом месторождении 303
Ботиров Шохбос Соибович
Номдоров Рустам Уралович
Ражабов Шахбоз Холмамат угли

Исследование химического состава, петрографических особенностей и форм нахождения меди в шлаках печи Ванюкова 313
Курбанов Бунёд Тулкинович
Ваккасов Бахтияр Абдураимович
Хасанов Улугбек Абдирашидович

Экспериментальное исследование влияния флюорита на качество металла при электрошлаковом переплаве 324
Мадалиев Самандар Дилшод угли
Чиллабаев Самандар Бурхон угли
Махмадиёров Сайфиллажон Аслиддин угли
Абдуллаев Фарход Бекпулат угли
Абсаломов Хумоюн Барат угли
Джамаладинов Лазизхон Аслиддинович

Оперативный сейсмоакустический мониторинг напряженно-деформированного состояния горного массива на базе микроконтроллерного модуля в сложных горно-геологических условиях 333
Назаров Заир Садикович
Мислибаев Илхом Туйчибаевич
Гиязов Отабек Мухитдинович
Шаропов Эркинжон Низомитдин угли
Толипов Саййидносир Обиджон угли
Саидрахматов Руслан Мирсаид угли

Повышение извлечения цинка из полиметаллических руд месторождения Хандиза применением двухстадиальной контрольной флотации 349
Ражабов Шахбоз Холмамат угли

Разработка технологии получения цилиндрических фильтров с анизотропной структурой из бронзовых порошков марки БрОФ10-1 под действием центробежных сил 356
Файзиев Миргани Мирвалиевич
Каршиев Мамарайим

Экспериментальное исследование влияния графита в составе керамического флюса на свойства наплавленного металла 368
Хожибекова Шохида Миродил кизи
Мадалиев Самандар Дилшод угли
Эркинбоева Мафтуна Элдор кизи
Обобакирова Мухлиса Алишер кизи
Уролова Сурайё Илхом кизи
Махмадиёров Сайфиллажон Аслиддин угли

Фазовый состав и микроструктура керамики Bi(Pb)-Sr-Ca-Cu-O на основе прекурсора солнечного плавления 378
Эшонкулов Элёр Бахтиёрович
Абдурахманов Кахар Паттахович
Коххаров Мирзохид Хусанбоевич
Султанов Амирхан Усубжон угли
Халилов Сарвар Самадович

Машиностроение и робототехника

Влияние профиля сужающегося канала на амплитуду и фазу пульсаций давления 388
Бабаджанов Юлдаш Тиловович
Бабаджанова Ирода Юлдашевна

Настройка спортивной винтовки на экстремальную кучность: теоретический анализ метода Игоря Жукова 398
Богословский Владимир Николаевич

Обоснование методики исследования температурной зависимости внутренних напряжений второго рода в твердых сплавах группы ТТК 422
Наумов Никита Павлович

Влияние точности межосевого расстояния цилиндрических зубчатых передач на ожидаемые эксплуатационные показатели технологических и сельскохозяйственных машин 434
Шаабидов Шорахмат Аскарович
Мамасобиров Умид Мамазокирович
Мирзаев Кахрамон Каршибоевич

Технология продовольственных продуктов и пищевая промышленность

Антиоксидантная и технологическая эффективность биоактивных соединений имбиря (Zingiber officinale) в пищевых системах 445
Азизходжаева Мохира Хусниддинхужа кизи
Хасанов Аббос Хасанович

Применение электрических полей для интенсификации сушки плодов: от электрогидродинамической сушки и импульсной обработки к обработке полем умеренной напряжённости 454
Гафуров Карим Хакимович
Рахмонов Шермурод Бахтиёрович
Файзиев Элбек Улугбекович

Фотохимические механизмы повреждения ДНК под действием ультрафиолетового излучения и клеточные системы её репарации 465
Имамова Дилфуза Аноровна
Бакахонов Анвар Акабирович[1]
Умирова Нилуфар Оманбаевна[2]
Лапасова Феруза Абдуллаевна[2]

Нутриентный профиль зернобобовых смесей с порошками крапивы, облепихи и чёрной смородины: сравнительный анализ рецептур 470
Камалова Фируза Рахматовна

Кинетика конвективной сушки кубиков дайкона, обработанных аскорбиновой кислотой 481
Мамадалиев Дониёр Шожалил ўғли
Мелибоев Мираъзам Фозилжон ўғли

Исследование зародышей пшеницы для производства мучных кондитерских изделий с высокой питательной ценностью 491
Миралимова Азиза Исамутдиновна
Сарболаев Фаррухбек Набиевич
Махмудова Дилдора Хасановна

Влияние частоты и амплитуды вибрации на продолжительность сушки и удельный расход энергии при виброконвективной сушке чеснока (расчётное исследование) 499
Миркомилов Абдурахмон Мираббос угли

Исследование физико-химических показателей и микробиологической безопасности лактозы, полученной из вторичного молочного сырья 506
Облобердиев Сардор Нормамат угли
Хамзалиев Мухаммаджон Абдуназар угли

Комплексная оценка выхода масла и сохранения липидных компонентов при постадийном рафинировании льняного масла 511
Рузметова Дилдора Тулибаевна
Салиханова Дилноза Саидакбаровна
Абдурахимов Ахрор Анварович
Ходжаев Сарвар Фехритдинович

Морка и сушка коконов тутового шелкопряда с помощью вакуумной установки: теоретические основы, математическое моделирование и технологический эффект 526
Сафаров Жасур Эсиргапович
Эргашев Жамшид Жуманазарович

Изучение переэтерифицирующей способности дисперсных катализаторов 536
Суванова Фаёза Усмановна

Совершенствование технологии конвективной сушки овощей под воздействием центробежной силы 543
Фамилзаде Рашад

Низкотемпературное осмотико-термическое вскрытие оболочки семян тыквы: обоснование режима методами дисперсионного анализа и поверхности отклика 553
Хаитов Рауф Арифович
Ёкубов Мухриддин Эркин угли
Рахмонов Кахрамон Санокулович
Ахмедова Мехринисо Бахромовна

Физико-химические закономерности удаления ионов тяжёлых металлов из водных растворов с использованием природных адсорбентов 563
Хакимова Дилафруз Йулдашбой кизи
Маматкулова Мохира Босимовна
Азаматов Умид Зокирович
Асомов Жавлон Хурсанович

Разработка поликомпонентной крупяной смеси с повышенным содержанием пищевых волокон для специализированного питания 568
Элмуродова Азима Сувон кизи

Синтез и физико-химическая идентификация комплексов Cu(II) и Zn(II) с витаминами B_3 и B_6 576
Эргашев Вахоб Эргашевич
Махамадиев Шарофиддин Жумабоевич
Хаджибеков Садриддин Насриддинович
Пулатхонова Мадинахон Акмалхон кизи

Изучение процесса инкапсуляции с использованием белковых и полисахаридных матриц 581
Эргашова Зилола Аваз кизи
Салижонова Шахнозахон Дилмуродовна
Рузибаев Акбарали Турсинбаевич

Инфраструктура и транспорт

Строительство, архитектура и жилищно-коммунальное хозяйство

Градостроительные принципы развития туристских поселений - горнолыжных курортов 588
Гейда Антон Васильевич
Шемякина Вероника Александровна

Анализ влияния частотного преобразователя на гидравлические режимы работы насосного агрегата D320/50 при орошении 604
Парпиев Сайфиддин Фазлиддинович
Уринov Искандар Шухратбек угли
Сайлиев Одилжон Ихтиёр угли
Ботирова Нигора Махаммаджон кизи

Общие свойства газобетона на основе волластонита 613
Сатторов Зафар Мурадович
Отажонов Олмосбек Аскарали угли

Программа городского развития для периферийных районов крупного города 623
Фазлыева Энже Маратовна
Крашенинников Алексей Валентинович

Исследование физико-механических свойств бетона, модифицированного резиновой крошкой и стальными волокнами, полученными из отходов автомобильных шин 635
Хасанов Собир Садыкович
Шакиров Икрам Исламович
Соттикулов Элёр Сотимбоевич

Матричный алгоритм поточной организации реконструкции промышленного предприятия и его программная реализация 648
Ходжаева Шахноза Назарбаевна

Энергетика и электроэнергетика

Влияние показателей качества электрической энергии на работу индукционных печей на Каршинском ремонтном заводе 657
Бейтуллаева Румия Хамидуллаевна
Ражабов Жавохир Тулкин угли
Жураева Мадина Жамшид кизи

Архитектура и алгоритмическое обеспечение программного комплекса для стохастической оптимизации энергобаланса в системах PV–BESS с регуляризацией управления 663
Джайков Гафур Муратбаевич
Баймуратова Гулайым Таджимурат кызы²

Разработка классификационной схемы компонентов керамических флюсов и математической модели формирования химического состава металла шва при автоматической дуговой сварке 673
Эрматов Зиядулла Досматович
Гальперин Леонид Владимирович
Рахматуллаева Нозима Тоир кизи

Транспорт и транспортные системы

Экспериментальный метод дополнительного охлаждения гидравлической рабочей жидкости 681
Абдуазизов Набижон Азаматович
Жураев Акбар Шавкатович
Исматов Адхамжон Алибек угли

Цифровая трансформация автомобильной промышленности Узбекистана 691
Мамасалиева Мукаддас Ибадуллаевна

Математическое моделирование и расчет критической частоты вращения карданных валов тяжелых грузовых автомобилей КамАЗ для исключения резонансных явлений 698
Сапаров Бердибай Бекбаулиевич
Хожаназаров Алишер Сапарбай улы
Шомирзаев Хумоюн Олимжонович
Тенелбаев Рахим Алауатдин улы

Критерии износа зубчатых передач и эффективные методы повышения их износостойкости 710
Юнусова Асал Нурбековна
Ишмуратов Хикмат Каххарович

Авиационная и ракетно-космическая техника

Обоснование вероятности отклонения пули от цели с помощью законов распределения и оценка её эффективности 717
Алламурадова Насиба Бахтияровна
Махмудов Неъматулло Ахтамович

Точный выстрел – это система: опыт чемпионов и современные методы настройки ELR-винтовок под патроны .338 LM, 33XC и .375 CheyTac 730
Жуков Игорь Геннадиевич

Экология и безопасность

Экология и техносферная безопасность

Научно-практическое обоснование влияния параметров фильтра на гидродинамические и технологические показатели при очистке промышленных пылегазовых потоков 751
Исомидинов Азизжон Саломидинович
Хомидов Хушнудбек Рапикжон угли

Многослойное водопроницаемое покрытие с функциями очистки, минерализации и регенерации для управления дождевым стоком 762
Косимова Хилола Абдувоид кизи
Абдукадирова Малохат Норижоновна

Солнечный и тепловой удар: причины, симптомы, профилактика и первая помощь 777
Мамадалиев Адхамжон Тухтамирзаевич
Мамаджанов Зокиржон Нематжанович

Методический подход к интегральной оценке технологического риска и архитектура адаптивного раннего оповещения для горно-металлургического предприятия 788
Уткирова Махлиё Рухиддиновна

Articles in English

Information and Digital Technologies

Computer Science, Computing and Control

Statistically weighted total-variation reconstruction for low-dose, sparse-view X-ray tomography: effects of dose, view number and model error 798
Allamuratova Nilufar Kuat qizi

Regret-aware shortlisting and decision-focused measures for choosing what to verify in candidate selection 812
Babayev Samir Cahid

Solid solutions in alkaline-earth titanosilicate systems: synthesis, properties and phase relations (a review) 820
Masobirova Dilnoza Isroil qizi
Mirsalimova Saodat Raxmatjanovna
Kadyrova Zulayxa Raimovna

Digital Transformation of Industries

Cross-level geographic attribution in china's 2025 5G factory register: a partial-identification audit of eight fuel-processing projects 827
Fu Shanning
Bekmuratov Dilshod Kasimovich[1]

From human error to intelligent monitoring: the role of ai in reducing non-productive time in well construction 839
Hajibayova Nigar Karim

The impact of data transmission delays on the calculation of emission dispersion into the atmosphere at a metallurgical plant 845
Minnegaliev Timur Damirovich

Opportunities for implementing internet of things technologies in digital public administration 851
Mukhtarov Mark Vahidovich

Industry and Manufacturing

Chemical Technologies and Chemical Industry

Review of modern technologies for rare earth element recovery from phosphorites, phosphogypsum, and other phosphate industry products 858
Abdullayev Lazizjon Luqmonjon ugli
Nomozov Shuhratjon Yuldashali ugli
Alimov Umarbek Kadirbergenovich
Ortikova Safiye Saidmambiyevna

Modification of phthalocyanine compounds and production of pigments based on them 866
Abjalilova Mashkhura
Jalilova Sitora
Tojiqulov Mukhtorbek
Fayziev Jakhongir

Comparative assessment of the chemical composition, XRF characteristics, and particle-size distribution of local sand raw materials for autoclaved aerated concrete production 876
Akramaliyeva Marhaboxon Maxmudjon qizi
Abduxakimov Tal'atjon Toxirjon o'g'li

Modern methods for the synthesis of basic aluminum chlorides and their application in the treatment of industrial wastewater from oil refineries 889
Gulomova Dilnoza Kudratovna
Narzullaeva Aziza Murodillaevna
Umarov Boburbek Nosir ugli
Sadikova Mukhayo Muratovna
Berkinbaeva Aknur Sabitovna

Recovery of thiocyanate from waste guanidine thiocyanate as copper(I) thiocyanate and the acid–base rationale for obtaining guanidinium polyacrylate 896
Qudratov Oston
Olimov Bobir
Akhmedov Vokhid

Polythermal solubility of the $Ca(ClO_3)_2$–$C_{10}H_{14}N_2Na_2O_8$–H_2O system 908
Siddikov Doniyorbek Ikromjon ugli
Olimov Nemat Kayumovich
Togasharov Akhat Salimovich

XRD analysis of calcium fluoride sample obtained from phosphogypsum 919
Turaxonov Ravshanbek
Sherkuziyev Doniyor

Physicochemical justification of the calcium chlorate production process using a secondary product from caustic soda production 930
Umirov Farkhod
Majidov Hayotjon
Vakhabov Rustam

Oil and Gas Industry. Hydrocarbon Processing

Investigation of the synthesis process of higher fatty acids from secondary paraffin feedstock 943
Fozilov Hasan
Turobjonov Sadriddin
Fozilov Sadriddin
Kholikova Sevara

Extraction of fatty acids from cottonseed oil soapstock using organic solvents 952
Samiyev Amin
Fozilov Sadriddin
Fozilov Hasan
Hakimova Sabina

Mechanical Engineering and Robotics

Hot extrusion of a 40Kh steel gear shaft: qform simulation of the thermo-mechanical fields and experimental validation of geometry, fibre flow and as-forged properties 962
Komilov Islom Raimkulovich
Abdullaev Fathulla Sagdullaevich
Abdukaxxarov Abduaziz Abdulazizxon ugli
Ahmadaliyev Shoxrux Shuhratovich
Jakhonov Shokhrukh Alikul ugli
Jurakulov Ikhtiyor Choriyevich
Abdullaeva Malika Khusniddin qizi

Textile and Light Industry

Achieving uniform colorimetric properties in cotton and regenerated bamboo yarns 977
Nabieva Iroda Abdusamatovna
Khasanova Makhfuza Shukhratovna
Norkulova Nargiza Isakul kizi
Abdumajidov Anvar Abdumalikovich

Possibilities of measuring wool fibre diameter from smartphone images 997
Valiyeva Zulfiya Fakhritdinovna
Khaydarov Ulugbek Panjiyevich
Sa'dullayev Shakhriyor Dilshod o'g'li

Infrastructure and Transport

Construction, Architecture and Housing and Utilities

Energy performance of basalt stone wool facades in Uzbekistan 1006
Akhmadiyorov Ulugbek Solijonovich
Babayev Nasrullo Nurillaevich

Effect of pipe elbow angle on flow kinematics and hydraulic losses based on ANSYS Fluent simulation 1014
Norkulov Bakhodir Musulmanovich
Suvonov Obidjon Shukurullayevich

Reconstructing the lost architectural and planning structure of the historic centre of Margilan, Uzbekistan 1027
Numonov Jasurbek Omonjon ogli
Sulaymonov Omonjon Numonovich

Static and modal response of closed reinforced concrete frames with tightly fitted aerated-concrete infill: Tests, force-method analysis and nonlinear finite element modelling 1035
Sanayeva Nargiza
Khaydarova Kamola

Agricultural Engineering and Agro-Industrial Technologies

Impact of sprinkler irrigation intensity on carrot yield and water productivity in Uzbekistan 1050
Burkhonova Munisakhon
Matyakubov Bakhtiyar
Kasimbetova Saltanat
Nazaraliyev Dilshod

СТАТЬИ НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Статья поступила в редакцию: 23.09.2026
Статья принята к публикации: 02.11.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 004.82:519.816

DOI: 10.32743/UniTech.2026.152.11.23657

Многокритериальный выбор классов программных решений для подбора исполнителей студенческих проектов

Гурьянова Ирина Владимировна
старший преподаватель
ФГАОУ ВО Белгородский национальный исследовательский университет
Российская Федерация, г. Белгород
E-mail: gurjanova@bsuedu.ru

Путивцева Наталья Павловна
доц., канд. техн. наук, доц.
ФГАОУ ВО Белгородский национальный исследовательский университет
Российская Федерация, г. Белгород

Зайцева Татьяна Валентиновна
доц., канд. техн. наук, доц.
ФГАОУ ВО Белгородский национальный исследовательский университет
Российская Федерация, г. Белгород

Multi-criteria selection of software solution classes for matching executors to student projects

Gur'yanova Irina Vladimirovna
senior lecturer
Belgorod National Research University
Russia, Belgorod

Библиографическое описание: Гурьянова И.В., Путивцева Н.П., Зайцева Т.В. Многокритериальный выбор классов программных решений для подбора исполнителей студенческих проектов // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23657

Putivtseva Natalya Pavlovna
candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Belgorod National Research University
Russia, Belgorod

Zaitseva Tatyana Valentinovna
candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Belgorod National Research University
Russia, Belgorod

Аннотация

Цель. Целью работы является сравнительный анализ классов программных решений для подбора исполнителей студенческих проектов и выявление наиболее предпочтительного класса на основе многокритериального экспертного оценивания.

Методология. Использован метод анализа иерархий (МАИ), реализующий иерархическую процедуру парных сравнений. Построена трехуровневая иерархия: цель — критерии — альтернативные классы программ. Матрицы парных сравнений заполнены экспертом; рассчитаны локальные векторы приоритетов и на основе линейной свёртки — вектор глобальных приоритетов альтернатив.

Результаты. На основе анализа библиографических источников и ресурсов сети Интернет определены особенности реализации студенческих проектов; установлено, что специализированных программных средств подбора исполнителей-студентов не разработано, а имеющиеся разработки вузов (программы, Интернет-порталы) используются в локальных целях. Выделены четыре класса программных решений, пригодных для подбора исполнителей, обоснованы шесть критериев сравнения и построена сводная таблица характеристик классов программ. По результатам расчёта вектора глобальных приоритетов наиболее предпочтительным признан класс специализированных HR-платформ (ATS) — 0,3024.

Выводы. Несмотря на высокую стоимость и сложность внедрения, специализированные HR-платформы обеспечивают максимальную автоматизацию рутинных процессов и глубокую аналитику, что важно для объективной оценки и выбора кандидатов из большого потока. Полученные результаты служат основой для создания собственного программного средства подбора исполнителей студенческих проектов с учётом наилучшей реализации функционала.

Abstract

Objective. The aim of the work is to conduct a comparative analysis of classes of software solutions for selecting performers for student projects and to identify the most preferable class based on multi-criteria expert assessment.

Methodology. The method of hierarchy analysis (MAI) was used, which implements a hierarchical procedure of pairwise comparisons. A three-level hierarchy was built: goal — criteria — alternative classes of programs. The pairwise comparison matrices were filled in by an expert; local priority vectors were calculated, and a vector of global priorities for the alternatives was derived using linear aggregation.

Results. Based on the analysis of bibliographic sources and Internet resources, the features of implementing student projects have been identified; it has been established that no specialized software tools for selecting student performers have been developed, and the existing developments by universities (programs, Internet portals) are used for local purposes. Four classes of software solutions suitable for selecting performers have been identified, six comparison criteria have been substantiated, and a summary table of the characteristics of the program classes has been constructed. Based on the results of calculating the vector of global priorities, the class of specialized HR platforms (ATS) has been recognized as the most preferable — 0.3024.

Conclusions. Despite the high cost and complexity of implementation, specialized HR platforms provide maximum automation of routine processes and in-depth analytics, which is important for the objective assessment and selection of candidates from a large pool. The results obtained serve as the basis for creating our own software tool for selecting performers for student projects, taking into account the best possible implementation of the functionality.

Ключевые слова: многокритериальный выбор, метод анализа иерархий, подбор исполнителей, студенческие проекты, классы программных решений.

Keywords: multi-criteria selection, hierarchy analysis method, selection of performers, student projects, classes of software solutions.

Введение

Современные требования рынка труда и практико-ориентированность обучения в вузах приводят к необходимости реализации в образовательном процессе различных проектов, как полностью студенческих, так и с привлечением студентов в команду научных и научно-педагогических работников. Проекты, создаваемые по результатам выигранных грантов от научных фондов (например, РНФ, Российский научный фонд), в обязательном порядке предполагают подключение молодых участников, в том числе студентов и аспирантов.

Если проектные команды полностью студенческие, то для них характерна разнопрофильность, проекты часто носят междисциплинарный характер, а в качестве заказчиков, консультантов, экспертов активно привлекаются ведущие представители профессионального сообщества [1, 2].

Подбор исполнителей для студенческих проектов — это задача, которая отличается от найма в коммерческую компанию. Здесь ключевыми факторами являются не только текущие навыки, но и потенциал, мотивация к обучению и способность работать в команде. Часто процесс осложняется тем, что у студентов еще нет обширного портфолио или подтвержденного опыта работы. Под студенческим проектом в данной работе понимается учебный, научно-исследовательский или практико-ориентированный проект, выполняемый студентами (полностью или в составе команды с научно-педагогическими работниками) и предполагающий распределение ролей и задач между исполнителями. Под подбором исполнителей понимается процесс выявления, оценки и отбора студентов для включения в проектную команду на основе их навыков, потенциала, мотивации и способности к командной работе.

Анализ библиографических источников и ресурсов сети Интернет показал, что вопросы применения программных продуктов для управления проектами в образовательной сфере рассматривались в работах М.А. Плахотниковой и Ю.В. Вертаковой [3], А.С. Бучацкого [4]. Сравнительным анализом российских программных продуктов для автоматизации управления проектами занимались И.А. Иванова [5], Е.В. Буценко и Н.Г. Кондрашкова [6]. В работах [7–9] описаны отдельные инструменты и подходы к управлению проектами и подбору участников, в том числе веб-сервис UtmnTeam [8]. Вместе с тем, как показал анализ, специализированных программных средств подбора исполнителей-студентов не разработано; имеющиеся разработки университетов (программы, Интернет-порталы) используются в локальных целях. Для подбора исполнителей студенческих проектов можно использовать как универсальные, так и специализированные программные средства; выбор зависит от масштаба, бюджета и требуемой степени автоматизации [9].

Таким образом, проблема исследования заключается в отсутствии обоснованного выбора класса программных решений для подбора исполнителей студенческих проектов.

Цель работы — провести сравнительный анализ классов программных решений для отбора исполнителей в студенческие проекты, выявить наиболее подходящий класс программ и определить лидера по каждому критерию для последующего создания собственного программного средства с учётом наилучшей реализации функционала.

Для достижения цели поставлены следующие задачи исследования:

1. выделить классы программных решений, пригодные для подбора исполнителей студенческих проектов, и дать их содержательное описание;
2. обосновать критерии сравнения классов программ с учётом особенностей студенческих проектов и требуемого программного функционала;
3. описать метод анализа иерархий как инструмент многокритериального оценивания;
4. провести оценивание альтернативных классов программ по обоснованным критериям и рассчитать вектор глобальных приоритетов;
5. определить наиболее предпочтительный класс программных решений для подбора исполнителей студенческих проектов.

Материалы и методы

В качестве методологии используется аппарат многокритериального экспертного оценивания — метод анализа иерархий (МАИ), реализующий иерархическую процедуру парных сравнений [10, 11]. Задача выбора класса программ представляется в виде трехуровневой иерархии: на первом уровне — цель (выбор класса программ), на втором — критерии сравнения классов программ, на третьем — сравниваемые альтернативные классы программ. На каждом уровне иерархии её элементы сравниваются попарно, и вычисляется вектор локальных приоритетов, отражающий степень важности сравниваемых элементов для достижения цели. Вектор глобальных приоритетов альтернатив рассчитывается как взвешенная сумма соответствующих компонент векторов локальных приоритетов; компонента вектора с наибольшим значением соответствует наиболее предпочтительной альтернативе.

Матрица парных сравнений строится по шкале относительной важности Т. Саати (от 1 до 9) [10]. Для матрицы парных сравнений A = (a_{ij}) размера n × n локальный вектор приоритетов w = (w_1, …, w_n) определяется как нормированный главный собственный вектор:

$$A \cdot w = \lambda_{\max} \cdot w, \tag{1}$$

где λ_{max} — максимальное собственное значение матрицы A.

Компоненты вектора локальных приоритетов вычисляются по формуле:

$$w_i = \frac{\left(\prod_{j=1}^{n} a_{ij}\right)^{1/n}}{\sum_{k=1}^{n}\left(\prod_{j=1}^{n} a_{kj}\right)^{1/n}}, \quad i = \overline{1,n}, \tag{2}$$

где a_{ij} — элемент матрицы парных сравнений (оценка превосходства элемента i над элементом j); n — число сравниваемых элементов.

Согласованность суждений эксперта оценивается индексом согласованности (ИС) и отношением согласованности (ОС):

$$\text{ИС} = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1}, \tag{3}$$

$$\text{ОС} = \text{ИС} / \text{СИ}, \tag{4}$$

где СИ — случайный индекс для матрицы порядка n. При ОС ≤ 0,10 согласованность суждений считается приемлемой [10, 11].

Вектор глобальных приоритетов альтернатив рассчитывается на основе линейной свёртки:

$$G_k = \sum_{i=1}^{m} w_i \cdot w_{ik}, \quad k = \overline{1,K}, \tag{5}$$

где G_k — глобальный приоритет k-й альтернативы; w_i — локальный приоритет i-го критерия; w_{ik} — локальный приоритет k-й альтернативы по i-му критерию; m — число критериев.

Оценивание выполнялось одним экспертом — специалистом в области управления проектами и подбора персонала, имеющим высшее образование в области информационных технологий и практический опыт сопровождения студенческих проектных команд в вузе (стаж работы по профилю — более 5 лет). Эксперт заполнял матрицы парных сравнений критериев и альтернатив по критериям. В дальнейшем планируется проведение оценки с группой экспертов и проверка согласованности их суждений.

Результаты и обсуждение

На основе анализа особенностей студенческих проектов, студентов как исполнителей и требуемого программного функционала выделены четыре класса программных решений, которые могут быть использованы для подбора исполнителей:

1. **Системы управления проектами и совместной работы (СУП)** — наиболее гибкий и часто бесплатный вариант, подходящий для организации процесса отбора, особенно если команда уже использует эти инструменты для основной работы [7, 9, 12]. Примеры: Trello, Notion, MS Teams / Slack. Преимущества: визуальный и интуитивно понятный интерфейс, возможности командной работы, гибкая настройка (Notion позволяет создать полноценную ATS с нуля). Недостатки: отсутствие встроенных функций автоматического расчёта рейтинга (оценки вносятся вручную), необходимость времени на первоначальную настройку, язык формул может показаться сложным для новичков; коммуникационные инструменты (MS Teams / Slack) не структурируют процесс, а лишь дополняют его.

2. **Специализированные HR-платформы (ATS — Applicant Tracking Systems)** — профессиональные системы управления подбором персонала. Для студенческих проектов они могут быть избыточны, но незаменимы в крупных вузах или при массовом наборе (например, на проектные сессии) [13, 14]. Примеры: Potok, Huntflow, 1С:ЗУП КОРП (модуль «Подбор»), SAP SuccessFactors. Преимущества: полная автоматизация рутины (от публикации до отправки оффера), структурированное хранение данных о кандидатах, встроенные аналитические отчёты (скорость закрытия «вакансии», эффективность источников). Недостатки: высокая стоимость подписки или лицензии, сложность внедрения и необходимость обучения пользователей.

3. **Корпоративные порталы и LMS (системы управления обучением)** — отбор проводится через внутренние системы вуза: на корпоративном портале создаётся страница проекта с описанием задач и требований, заявки студентов отслеживаются через специальную форму [8, 15]. Преимущества: полная интеграция с данными вуза (успеваемость, посещаемость), единое информационное пространство для студентов и преподавателей. Недостатки: доступно только в вузах с развитой IT-инфраструктурой, функционал часто ограничен возможностями конкретной платформы.

4. **Облачные таблицы (ОТ)**, например Google Sheets / Microsoft Excel Online, — самый простой и доступный инструмент для формализации оценки [16, 17]. Преимущества: бесплатно, знакомо большинству пользователей, легко реализовать сложную логику расчёта рейтинга. Недостатки: нет визуализации этапов воронки найма (как в Trello), процесс подачи заявки остаётся внешним (например, через почту).

На основе анализа особенностей студенческих проектов и студентов как исполнителей и требуемого программного функционала сформулированы критерии, достаточные для сравнения классов программ с учётом особенностей студенческих проектов. Критерии являются оригинальными результатами работы авторов. Все критерии носят качественный характер и оцениваются по порядковой шкале (ранговые суждения эксперта), количественные значения для них не задаются; содержание критериев раскрыто ниже:

• **Стоимость (С)** — затраты на приобретение и сопровождение программного решения; чем меньше стоимость, тем предпочтительнее критерий. Качественная шкала: «бесплатно / низкая», «средняя», «высокая».

• **Гибкость (Г)** — возможность настройки процессов, форм и структуры данных под задачи студенческого проекта. Качественная шкала: «низкая», «средняя», «высокая», «максимальная».

• **Сложность внедрения (СВ)** — трудоёмкость развёртывания и обучения пользователей; чем ниже сложность, тем предпочтительнее критерий. Качественная шкала: «низкая», «средняя», «высокая».

• **Уровень автоматизации (УА)** — степень автоматизации рутинных операций (публикация, сбор заявок, расчёт рейтинга, отчёты). Качественная шкала: «только расчёт рейтинга», «частичная», «полная», «зависит от платформы».

• **Возможность организации командной работы (ВК)** — наличие инструментов совместной работы куратора, наставника и кандидата. Качественная шкала: «хорошая», «отличная».

• **Аналитика (А)** — наличие встроенных аналитических отчётов и визуализаций. Качественная шкала: «базовая», «продвинутая», «требует ручной настройки».

Сводная информация для сравнения классов программ представлена в таблице 1.

Таблица 1. Сводная таблица для выбора класса программных решений

Критерий	**Системы управления проектами и совместной работы (Trello / Notion)**	**Специализированные HR-платформы (ATS)**	**Корпоративный портал / LMS**	**Облачные таблицы (Google Sheets)**
Стоимость	Бесплатно / низкая	Высокая	Обычно бесплатно (внутри вуза)	Бесплатно
Гибкость	Высокая	Средняя (настраиваемые процессы)	Низкая (зависит от платформы)	Максимальная
Сложность внедрения	Низкая / средняя	Высокая	Средняя / высокая	Низкая
Уровень автоматизации	Частичная (через интеграции)	Полная	Зависит от платформы	Только расчёт рейтинга
Возможность организации командной работы	Отличная	Отличная	Хорошая	Хорошая
Аналитика	Базовая (визуальная)	Продвинутая	Базовая	Требует ручной настройки

Цель оценивания альтернатив по МАИ — определить наиболее предпочтительный класс программных решений для подбора исполнителей студенческих проектов и получить количественную оценку предпочтительности каждого класса. Она отличается от цели работы: цель работы — провести сравнительный анализ классов программ и выявить наиболее подходящий класс для последующего создания собственного программного средства.

На первом этапе проведено заполнение матрицы парных сравнений критериев и расчёт вектора локальных приоритетов критериев (таблица 2).

Таблица 2. Матрица парных сравнений критериев

Критерий	**Стоимость**	**Гибкость**	**Сложность внедрения**	**Уровень автоматизации**	**Возможность организации командной работы**	**Аналитика**	**Вес**
Стоимость	1	2	1/2	2	1/2	1/3	0,1077
Гибкость	1/2	1	1/5	1/2	1/5	1/6	0,0445
Сложность внедрения	2	5	1	4	1	1/2	**0,2130**
Уровень автоматизации	0,5	2	1/4	1	1/5	1/6	0,0582
Возможность организации командной работы	2	5	1	5	1	1/2	**0,2211**
Аналитика	3	6	2	6	2	1	**0,3555**

Анализ вектора локальных приоритетов показал, что при выборе класса программ наиболее важными являются критерии «Аналитика» (0,3555), «Возможность организации командной работы» (0,2211) и «Сложность внедрения» (0,2130).

Далее альтернативные классы программ сравнивались по выделенным критериям (таблицы 3–8).

Таблица 3. Матрица парных сравнений альтернатив по критерию «Стоимость»

Альтернатива	**Системы управления проектами и совместной работы**	**Специализированные HR-платформы (ATS)**	**Корпоративный портал / LMS**	**Облачные таблицы**	**Вес**
Системы управления проектами и совместной работы	1	4	2	1	**0,3598**
Специализированные HR-платформы (ATS)	1/4	1	1/3	1/4	0,0813
Корпоративный портал / LMS	1/2	3	1	1/2	0,1991
Облачные таблицы	1	4	2	1	**0,3598**

Наименьшая стоимость у программ класса «Системы управления проектами и совместной работы» и «Облачные таблицы».

Таблица 4. Матрица парных сравнений альтернатив по критерию «Гибкость»

Альтернатива	Системы управления проектами и совместной работы	Специализированные HR-платформы (ATS)	Корпоративный портал / LMS	Облачные таблицы	Вес
Системы управления проектами и совместной работы	1	2	3	1/2	**0,2712**
Специализированные HR-платформы (ATS)	1/2	1	2	1/4	0,1457
Корпоративный портал / LMS	1/3	1/2	1	1/4	0,0931
Облачные таблицы	2	4	4	1	**0,4901**

Наиболее гибкими являются облачные таблицы. На втором месте — системы управления проектами и совместной работы.

Таблица 5. Матрица парных сравнений альтернатив по критерию «Сложность внедрения»

Альтернатива	Системы управления проектами и совместной работы	Специализированные HR-платформы (ATS)	Корпоративный портал / LMS	Облачные таблицы	Вес
Системы управления проектами и совместной работы	1	3	2	1/2	**0,2776**
Специализированные HR-платформы (ATS)	1/3	1	1/2	1/4	0,0953
Корпоративный портал / LMS	1/2	2	1	1/3	0,1603
Облачные таблицы	2	4	3	1	**0,4668**

Наименее сложным внедрением характеризуются облачные таблицы и системы управления проектами и совместной работы.

Таблица 6. Матрица парных сравнений альтернатив по критерию «Уровень автоматизации»

Альтернатива	Системы управления проектами и совместной работы	Специализированные HR-платформы (ATS)	Корпоративный портал / LMS	Облачные таблицы	Вес
Системы управления проектами и совместной работы	1	1/2	2	3	**0,2776**
Специализированные HR-платформы (ATS)	2	1	3	4	**0,4668**
Корпоративный портал / LMS	1/2	1/3	1	2	0,1603

Альтернатива	Системы управления проектами и совмест-ной работы	Специализированные HR-платформы (ATS)	Корпоратив-ный портал / LMS	Облачные таблицы	Вес
Облачные таблицы	1/3	1/4	1/2	1	0,0953

По уровню автоматизации лидируют специализированные HR-платформы. На втором месте — системы управления проектами и совместной работы.

Таблица 7. Матрица парных сравнений альтернатив по критерию «Возможность организации командной работы»

Альтернатива	Системы управления проектами и совмест-ной работы	Специализированные HR-платформы (ATS)	Корпоратив-ный портал / LMS	Облачные таблицы	Вес
Системы управления проектами и совместной работы	1	1	2	2	**0,3333**
Специализированные HR-платформы (ATS)	1	1	2	2	**0,3333**
Корпоративный портал / LMS	1/2	1/2	1	1	0,1667
Облачные таблицы	0,5	1/2	1	1	0,1667

Командная работа наилучшим образом организована в специализированных HR-платформах и системах управления проектами и совместной работы.

Таблица 8. Матрица парных сравнений альтернатив по критерию «Аналитика»

Альтернатива	Системы управления проектами и совмест-ной работы	Специализированные HR-платформы (ATS)	Корпоратив-ный портал / LMS	Облачные таблицы	Вес
Системы управления проектами и совместной работы	1	1/3	1/2	2	0,1603
Специализированные HR-платформы (ATS)	3	1	2	4	**0,4668**
Корпоративный портал / LMS	2	1/2	1	3	**0,2776**
Облачные таблицы	0,5	1/4	1/3	1	0,0953

Аналитика лучше всего представлена в специализированных HR-платформах и корпоративных порталах / LMS.

Финальным этапом был расчёт вектора глобальных приоритетов альтернатив на основе линейной свёртки по формуле (5). Например, для класса «Системы управления проектами и совместной работы»:

$$G_{\text{СУП}} = 0{,}1077 \cdot 0{,}3598 + 0{,}0445 \cdot 0{,}2712 + 0{,}2130 \cdot 0{,}2776 + 0{,}0582 \cdot 0{,}2776 + 0{,}2211 \cdot 0{,}3333 + 0{,}3555 \cdot 0{,}1603 = 0{,}2568. \quad (6)$$

Аналогично рассчитаны глобальные приоритеты остальных альтернатив. Результаты расчёта представлены в таблице 9.

Таблица 9. Вектор глобальных приоритетов альтернатив

Альтернатива	**Системы управления проектами и совместной работы**	**Специализированные HR-платформы (ATS)**	**Корпоративный портал / LMS**	**Облачные таблицы**
Глобальный приоритет	0,2568	0,3024	0,2046	0,2363

Заключение

Проведённое исследование позволило выделить четыре класса программных решений, пригодных для подбора исполнителей студенческих проектов, обосновать шесть критериев их сравнения с учётом особенностей студенческих проектов и требуемого программного функционала и выполнить многокритериальное оценивание классов программ с использованием метода анализа иерархий. Показано, что специализированных программных средств подбора исполнителей-студентов не разработано, а имеющиеся разработки вузов используются в локальных целях.

Наиболее предпочтительным классом программных решений для отбора исполнителей в студенческие проекты являются специализированные HR-платформы (глобальный приоритет 0,3024). Несмотря на их высокую стоимость и сложность внедрения, именно они могут обеспечить максимальную автоматизацию рутинных процессов и предоставить глубокую аналитику, что является важным аспектом для объективной оценки и выбора кандидатов из большого потока. Полученные результаты служат основой для создания собственного программного средства подбора исполнителей студенческих проектов с учётом наилучшей реализации функционала. Дальнейшим направлением работы является проведение оценивания с группой экспертов и проверка согласованности их суждений.

Список литературы

1. Лёвкина (Вылегжанина) А.О. Мультипроектное управление и системы проектного управления. – М.: Директ-Медиа, 2015. – 161 с.
2. Лёвкина (Вылегжанина) А.О. Информационно-технологическое и программное обеспечение управления проектом. – М.: Директ-Медиа, 2015. – 431 с.

3. Плахотникова М.А., Вертакова Ю.В. Программные продукты для управления командой и проектами в научной и образовательной сферах: общий обзор // В сборнике: Управление социально-экономическим развитием регионов: проблемы пути и их решения. Сборник научных статей 8-ой Международной научно-практической конференции. – 2018. – С. 259–263.
4. Бучацкий А.С. Автоматизация управления проектами в государственном секторе // В сборнике: Подготовка профессиональных кадров в магистратуре для цифровой экономики (ПКМ). – 2022. – С. 439–442.
5. Иванова И.А. Сравнительный анализ российских программных продуктов для автоматизации управления проектами // Академия педагогических идей Новация. Серия: Научный поиск. – 2017. – № 3. – С. 20–24.
6. Буценко Е.В., Кондрашкова Н.Г. Сравнительный анализ российских программных продуктов для автоматизации управления проектами // Экономика и социум. – 2024. – № 1 (116). – С. 1621–1626.
7. А.О. Лёвкина. Лёвкина (Вылегжанина) А.О. CRM-системы. – М.: Директ-Медиа, 2016. – 101 с.
8. Мельникова А.В., Воробьева М.С., Плотоненко Ю.А. Веб-сервис UtmnTeam: подбор исполнителей для ИТ-проектов на основе структурированных и неструктурированных данных о студентах // Программные продукты и системы. – 2025. – № 2. – С. 325–336. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/veb-servis-utmnteam-podbor-ispolniteley-dlya-it-proektov-na-osnove-strukturirovannyh-i-nestrukturirovannyh-dannyh-o-studentah (дата обращения: 24.08.2026).
9. Лёвкина (Вылегжанина) А.О. Информационно-технологическое и программное обеспечение управления проектом. – М.: Директ-Медиа, 2015. – 431 с.
10. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. – М.: Радио и связь, 1993. – 278 с.
11. Saaty T.L. The Analytic Hierarchy Process. – New York: McGraw-Hill, 1980. – 287 P.
12. Бурлакова И.В. Семинар-практикум по составлению и использованию организационной модели проектно-исследовательской деятельности обучающихся // Методист. – 2016. – № 3. – С. 25–28.
13. Рейтинг LMS-платформ: 10 лучших систем для корпоративного обучения в 2026 году и критерии выбора [Электронный ресурс]. URL: https://korusconsulting.ru/blog/tekhnologii/reyting-lms-platform-10-luchshikh-sistem-dlya-korporativnogo-obucheniya-v-2026-godu-i-kriterii-vybor/ (дата обращения: 18.08.2026).
14. Система управления обучением. LMS Модули: конструктор LMS для развития сотрудников и повышения производительности [Электронный ресурс]. URL: https://gamificationlab.com/products/learning-management-systems (дата обращения: 17.08.2026).
15. Сафонова К.И., Подольский С.В. Проектная деятельность студентов в вузе: принципы отбора проектов и критерии формирования проектных групп // Общество: социология, психология, педагогика. – 2017. – № 9. – С. 52–61. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/proektnaya-deyatelnost-studentov-v-vuze-printsipy-otbora-proektov-i-kriterii-formirovaniya-proektnyh-grupp (дата обращения: 26.08.2026).

16. Захарова Т.И. Теория и практика рекрутинга: М.: ЕАОИ, 2010. [Электронный ресурс]. // Лань: электронно-библиотечная система. – 256 с. URL: https://e.lanbook.com/book/126553 (дата обращения: 24.08.2026).
17. Поляков Н.А., Мотовилов О.В., Лукашов Н.В. Управление инновационными проектами: М.: Издательство Юрайт. – 2023. – 384 с.

References

1. Levkina (Vylegzhanina) A.O. Multiproject management and project management systems. – Moscow: Direct–Media, 2015. – 161 P.
2. Levkina (Vylegzhanina) A.O. Information technology and project management software. – Moscow: Direct-Media, 2015. – 431 P.
3. Plakhotnikova M.A., Vertakova Yu.V. Software products for team and project management in the scientific and educational fields: a general overview // In the collection: Management of socio-economic development of regions: problems of the path and their solutions. Collection of scientific articles of the 8th International Scientific and Practical Conference. – 2018. – P. 259–263.
4. Buchatskiy A.S. Automation of project management in the public sector // In the collection: Training of professional staff in the Master's degree program for the Digital Economy (DCM). – 2022. – P. 439–442.
5. Ivanova I.A. Comparative analysis of Russian software products for project management automation // Academy of Pedagogical Ideas Novation. Series: Scientific search. – 2017. – No. 3. – P. 20–24.
6. Butsenko E.V., Kondrashkova N.G. Comparative analysis of Russian software products for project management automation // Economics and society. – 2024. – No. 1 (116). – P. 1621–1626.
7. A.O. Levkina. Levkina (Vylegzhanina) A.O. CRM systems. – Moscow: Direct-Media, 2016. – 101 P.
8. Melnikova A.V., Vorobyeva M.S., Plotonenko Yu.A. UtmnTeam web service: selection of performers for IT projects based on structured and unstructured student data // Software Products and Systems. – 2025. – No. 2. – P. 325–336. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/veb-servis-utmnteam-podbor-ispolniteley-dlya-it-proektov-na-osnove-strukturirovannyh-i-nestrukturirovannyh-dannyh-o-studentah (accessed: 08/24/2026).
9. Levkina (Vylegzhanina) A.O. Information technology and project management software. – Moscow: Direct-Media, 2015. – 431 P.
10. Saati T. Decision-making. Method of hierarchy analysis. – Moscow: Radio and Communications, 1993. – 278 P.
11. Saaty T.L. The Analytic Hierarchy Process. – New York: McGraw-Hill, 1980. – 287 P.
12. Burlakova I.V. Workshop on the compilation and use of an organizational model of students' design and research activities // Methodologist. – 2016. – No. 3. – P. 25–28.

13. Rating of LMS platforms: the 10 best systems for corporate training in 2026 and selection criteria [Electronic resource]. / (date of access: 08/18/2026). – URL: https://korusconsulting.ru/blog/tekhnologii/reyting-lms-platform-10-luchshikh-sistem-dlya-korporativnogo-obucheniya-v-2026-godu-i-kriterii-vybor.
14. Learning management system. LMS Modules: an LMS constructor for employee development and productivity improvement [Electronic resource]. (date of request: 08/17/2026). – URL: https://gamificationlab.com/products/learning-management-systems.
15. Safonova K.I., Podolsky S.V. Project activity of students at the university: principles of project selection and criteria for the formation of project groups // Society: sociology, psychology, pedagogy. – 2026. – No. 9. – P. 52–61. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/proektnaya-deyatelnost-studentov-v-vuze-printsipy-otbora-proektov-i-kriterii-formirovaniya-proektnyh-grupp.
16. Zakharova T.I. Theory and practice of recruiting: Moscow: EAOI, 2010. [electronic resource]. / Lan: electronic library system. (date of reference: 08/24/2026). – 256 P. – URL: https://e.lanbook.com/book/126553.
17. Polyakov N.A., Motovilov O.V., Lukashov N.V. Management of innovative projects: Moscow: Yurayt Publishing House. – 2023. – 384 P.

Статья поступила в редакцию: 30.07.2026
Статья принята к публикации: 01.08.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 004.41

DOI: 10.32743/UniTech.2026.152.11.23667

Разработка и апробация модульно-конфигурируемой архитектурной модели формирования семейства вариативных мобильных приложений на основе единого MVVM-ядра

Панюшкин Андрей Михайлович
инженер-программист
ООО «СУПЕРНОВА-ТЕХ», студент 5-го курса, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва
Российская Федерация, г. Самара
E-mail: andreypanyshkin03@gmail.com

Слесарев Роман Александрович
руководитель отдела мобильной разработки
старший инженер-программист, ООО «СУПЕРНОВА-ТЕХ, независимый исследователь
Российская Федерация, г. Санкт-Петербург
E-mail: roma3625@gmail.com

Development and evaluation of a modular-configurable architectural model for a variant mobile application family based on a shared MVVM core

Paniushkin Andrei Mikhailovich
Software engineer, SUPERNOVA-TECH LLC, fifth-year student, Samara National Research University
Russia, Samara

Slesarev Roman Alexandrovich
Head of mobile development, Senior software engineer, SUPERNOVA-TECH LLC, independent researcher
Russia, Saint Petersburg

Аннотация

Цель исследования — разработать и провести расчётную апробацию архитектурной модели, позволяющую после создания эталонного мобильного приложения α формировать варианты $\beta_1 \ldots \beta_n$ из общего MVVM-ядра, функциональных модулей и конфигурационных манифестов. Методика включает формализацию точек вариативности, контроль ограничений совместимости, проверку конфигурационного прототипа и сопоставление трудоёмкости с независимой разработкой приложений с учётом интеграционно-тестовых расходов семейства.

Библиографическое описание: Панюшкин А.М., Слесарев Р.А. Разработка и апробация модульно-конфигурируемой архитектурной модели формирования семейства вариативных мобильных приложений на основе единого MVVM-ядра // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23667

В стенде заданы 12 функциональных модулей, 7 продуктов и 28 сочетаний «вариант × платформа × профиль сборки». Валидатор принял все допустимые конфигурации, обнаружил 120 из 120 одиночных и 60 из 60 смешанных мутаций; на отдельной выборке из 10 000 случайных манифестов его решение полностью совпало с независимым оракулом. В базовом сценарии семейство α + 6β требует 17 820 чел.-ч против 34 560 чел.-ч. Расчётная экономия составляет 16 740 чел.-ч, или 48,4 %, а при полной стоимости часа 3 000 руб. — 50,22 млн руб. В 100 000 сценариях Монте-Карло медианная экономия равна 25,8 %, 95 %-й интервал — от −9,1 до 48,3 %; отрицательный эффект возник в 7,2 % сценариев. Результаты характеризуют модельный контур, а не подтверждённую бухгалтерскую экономию конкретной компании. Практическая значимость состоит в воспроизводимой схеме перехода от единичного приложения к управляемому семейству продуктов.

Abstract

The study aims to develop and computationally evaluate an architectural model that transforms a reference α mobile application into $\beta_1 \ldots \beta_n$ variants assembled from a shared MVVM core, feature modules, and configuration manifests. The method formalizes variation points and compatibility constraints, validates a configuration prototype, and compares its effort with independent application development while accounting for family-wide integration and testing overhead. The evaluation model contains 12 feature modules, seven products, and 28 variant–platform–build-profile combinations. The validator accepted all valid configurations, detected 120 of 120 single and 60 of 60 mixed mutations, and fully agreed with an independent oracle on 10,000 random hold-out manifests. In the baseline α + 6β scenario, the family model requires 17,820 person-hours, compared with 34,560 person-hours for separate development. The calculated reduction is 16,740 person-hours, or 48.4 %; at a fully loaded rate of RUB 3,000 per hour, this corresponds to RUB 50.22 million. Across 100,000 Monte Carlo scenarios, the median effort saving is 25.8 %, with a 95 % interval from −9.1 % to 48.3 %; a negative outcome occurred in 7.2 % of scenarios. These values describe a modeled engineering environment rather than audited savings of a particular company. The practical contribution is a reproducible transition scheme from a single mobile application to a governed family of configurable products.

Ключевые слова: мобильное приложение, семейство программных продуктов, MVVM, вариативность, модульная архитектура, повторное использование, экономическая эффективность.

Keywords: mobile application, software product family, MVVM, variability, modular architecture, software reuse, economic efficiency.

Введение

Организация, выпускающая несколько мобильных приложений для разных брендов, регионов или каналов продаж, обычно начинает с одного работоспособного продукта. После появления второго заказа исходный репозиторий копируется, а различия закрепляются локальными ветвями, ресурсами и интеграциями. Такая стратегия clone-and-own

обеспечивает быстрый старт, но каждое общее изменение приходится повторять и проверять во всех копиях. По мере роста портфеля число фактически поддерживаемых реализаций начинает расти быстрее числа продуктовых функций.

Проблема имеет промышленный масштаб. В опросе 127 специалистов из более чем ста компаний свыше 66 % респондентов указали наличие базового продукта, от которого получают сходные решения; при этом формальное документирование общих и вариативных требований распространено недостаточно [1]. Международные стандарты продуктовых линий разделяют создание общих активов и получение конкретных продуктов, а feature-based PLE рассматривает функции и ограничения между ними как основу конфигурирования [8, 9].

В предыдущей работе авторов построена сравнительная таксономия архитектур клиентских приложений и сформулированы инварианты модульно-вертикальной конфигурации MVVM [2]. Настоящее исследование не повторяет сопоставление архитектурных семейств. Его предметом является следующий уровень: управление множеством поставляемых приложений, использующих одно ядро, но различающихся брендом, составом функций и внешними поставщиками.

Рабочая гипотеза состоит в том, что перенос вариативности из копий исходного кода в проверяемые манифесты и модули уменьшает предельную стоимость каждого следующего приложения. Эффект возникает не из самого названия MVVM, а из сочетания четырёх механизмов: стабильного ядра, публичных модульных контрактов, явной модели вариантов и автоматической сборочной матрицы.

Цель работы — разработать модульно-конфигурируемую архитектурную модель семейства мобильных приложений и оценить границы её инженерной и экономической целесообразности. Для достижения цели решаются задачи формального описания варианта; определения допустимых зависимостей; проектирования схемы $\alpha \rightarrow \beta_1 \ldots \beta_n$; построения прототипа конфигурационного контроля; расчёта трудоёмкости, точки окупаемости и чувствительности результата. Научно-практическая новизна состоит в формализации единого контура, связывающего MVVM-декомпозицию мобильного приложения, проверяемые ограничения продуктовой вариативности и параметрическую оценку порога экономической целесообразности перехода от отдельного приложения к семейству продуктов.

Материалы и методы

Исследование выполнено как расчётно-экспериментальная апробация референтной модели. Термин «семейство» используется в смысле набора приложений с управляемыми общими и различающимися активами [8, 12]. α обозначает эталонную реализацию, на которой стабилизируются общие контракты. β_v — не тестовая версия α, а отдельный поставляемый продукт, полученный конфигурированием общей платформы.

Архитектурная модель включает ядро C, конфигурационный манифест K_v, множество функциональных MVVM-модулей M_i и вариантные адаптеры P_v. Ядро содержит навигацию, сетевой транспорт, управление состоянием, журналирование, контракты идентификации и дизайн-токены, но не содержит брендовых правил. Каждый M_i владеет View, ViewModel,

Model, тестами и единственным публичным входом. P_v изолирует различия платёжных, аналитических и авторизационных поставщиков. Такой подход сохраняет ролевое разделение MVVM [10] и добавляет над ним границу поставляемого продукта.

Состав конкретного приложения задаётся оператором конфигурации:

$$A_v = C \oplus K_v \oplus \left(\sum_{i=1}^{m} x_{vi} M_i\right) \oplus P_v \quad (1)$$

где A_v — собираемый вариант; $x_{vi} \in \{0,1\}$ показывает включение модуля M_i; оператор $\oplus$ обозначает композицию при соблюдении публичных контрактов. В отличие от условных операторов, распределённых по исходному коду, манифест позволяет получить полный состав продукта до компиляции.

Манифест признаётся допустимым, если выполнены обязательные зависимости requires, взаимные исключения excludes и кардинальные ограничения групп:

$$valid(K_v) = \wedge (M_i \Rightarrow M_j) \wedge \wedge \neg (M_p \wedge M_q) \wedge \wedge (l_g \leq \sum_{i \in g} x_{vi} \leq u_g) \quad (2)$$

Проверка выполняется до запуска сборочной матрицы. Конфигурации Android проецируются в product flavors и build variants [4], iOS — в schemes и xcconfig-слои [5]. Платформенные различия небольшого масштаба допускаются через адаптер или платформенный файл; такой механизм поддерживается и React Native [13]. Runtime-флаги используются только для управляемого включения уже поставленного кода, но не подменяют продуктовую конфигурацию, поскольку иначе в пакет попадают лишние зависимости и усложняется сертификация состава.

Таблица 1. Архитектурные активы и точки вариативности

Элемент	Общий актив	Точка вариативности	Контроль
Навигация и жизненный цикл	маршрутизатор, контракты	стартовый граф, deep links	схема маршрутов
Идентификация и профиль	интерфейсы сессии	OIDC/OTP/корпоративный вход	ровно один адаптер
Каталог и операции	доменные типы	набор сценариев	requires/excludes
Платежи	контракт платежа	поставщик и валюты	один поставщик на рынок
Уведомления и аналитика	событийные контракты	SDK и политика согласия	allow-list зависимостей
Бренд и ресурсы	семантические токены	цвета, шрифты, иконки, тексты	проверка полноты
Платформа	общий ViewModel/Model	iOS/Android-адаптеры	контрактные тесты

Для апробации сформирован конфигурационный стенд из 12 функциональных модулей, пяти подсистем ядра и семи продуктовых манифестов: α и шести β. Для каждого продукта заданы две платформы и два профиля сборки, что образует 28 допустимых сочетаний. Валидатор проверяет 14 формализованных ограничений: семь requires, два excludes, одно cardinality и четыре resources. Негативная выборка содержит 120 конфигураций с одиночной контролируемой мутацией — по 30 нарушений каждой категории — и 60 конфигураций

с двумя или тремя одновременно внесёнными нарушениями. Отдельная тестовая выборка включает 10 000 случайно сгенерированных манифестов; решение валидатора сопоставляется с независимо реализованным булевым оракулом. Критерии приёмки: отсутствие ложного отказа на допустимой матрице, обнаружение каждой мутации и полное совпадение на отдельной выборке.

Прототип реализован на CPython 3.12.13 стандартной библиотекой и запущен в среде macOS arm64 с seed 20260729. Контрольная сумма исходного файла SHA-256: 2c9761cb41d660de7c5872534fa1222736485a85d0b33e7c303efb187e8362f8. Медианное время одной проверки на выборке случайных манифестов составило 1,3 мкс; это измерение характеризует только данный прототип и среду запуска.

Экономическая часть сравнивает две стратегии. В независимой стратегии α требует Hα часов, а каждый следующий продукт — Hβ часов. В семейной стратегии первый продукт с выделением ядра требует HF часов, а конфигурирование и уникальные расширения каждого β — HV часов. Дополнительно учитываются общесемейные расходы на интеграцию, регрессионную матрицу и управление конфигурациями: линейный член an отражает сопровождение каждого варианта, а квадратичный член bn² — рост межвариантных взаимодействий. Тогда накопленная трудоёмкость задаётся следующими выражениями:

$$H_{sep}(n) = H_{\alpha} + nH_{\beta} \tag{3}$$

$$H_{matrix}(n) = an + bn^2 \tag{4}$$

$$H_{fam}(n) = H_F + nH_V + H_{matrix}(n) \tag{5}$$

Относительная экономия и минимальное число β-вариантов для окупаемости определяются как:

$$E(n) = 1 - \frac{H_{fam}(n)}{H_{sep}(n)} \tag{6}$$

$$n^* = min\{n \in \mathbb{N}_0 \mid H_{fam}(n) \leq H_{sep}(n)\} \tag{7}$$

Если общесемейные расходы отсутствуют, то есть a = b = 0, выражение (7) переходит в замкнутую форму:

$$n^* = max\{0,\ ceil(\frac{H_F - H_{\alpha}}{H_{\beta} - H_V})\},\quad a = b = 0,\quad H_{\beta} > H_V \tag{8}$$

Базовые параметры составляют H_{α} = 5 760, H_{β} = 4 800, H_F = 6 720 и H_V = 1 520 чел.-ч., a = 120 чел.-ч и b = 35 чел.-ч. Премия первого семейного продукта равна 960 чел.-ч и покрывает выделение контрактов и манифеста; Hmatrix отдельно учитывает последующее расширение сборочно-тестовой матрицы. Полная стоимость часа принимается равной 3 000 руб. Значение является сценарным коэффициентом, а не раскрытием ставок или финансовой отчётности ООО «СУПЕРНОВА-ТЕХ».

Для анализа чувствительности выполнено 100 000 испытаний Монте-Карло с фиксированным seed 20260729. Стресс-диапазоны допускают как положительный, так и отрицательный эффект: ∼ Tri(4 800; 5 760; 7 200), ∼ Tri(3 500; 4 800; 6 200), ∼ Tri(6 000; 7 200; 12 000), ∼ Tri(1 200; 1 800; 4 500), a ∼ Tri(40; 120; 320), b ∼ Tri(5; 35; 120), а стоимость часа ∼ Tri(2 200; 3 000; 4 200) руб. Общий масштаб продукта создаёт положительную зависимость и: применена ранговая гауссова связка с параметром 0,65; выборочная корреляция составила 0,642. Остальные параметры считаются независимыми. Метод расчёта следует логике жизненного цикла продуктовой линии, где премия за повторное использование сопоставляется с экономией на производных продуктах [6]. $H_\alpha H_\beta H_F H_V H_\alpha H_F$

Результаты и обсуждение

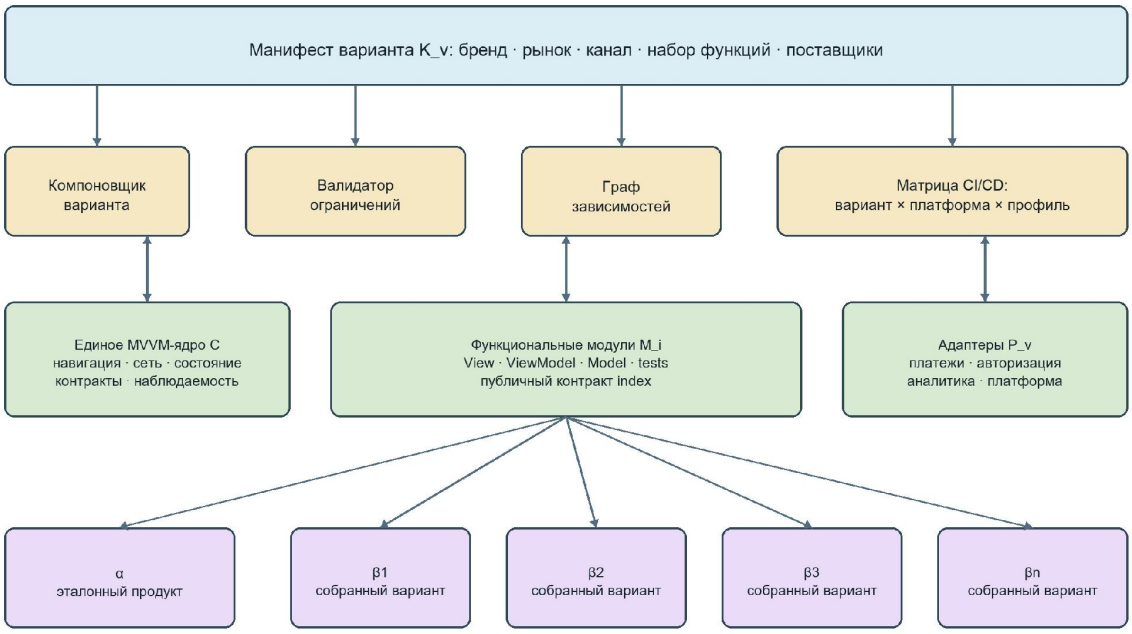


Рисунок 1. Модульно-конфигурируемая модель семейства приложений

Рисунок 1 показывает разделение двух осей. Вертикальная ось MVVM локализует представление, состояние и модель внутри функции. Горизонтальная ось вариативности выбирает функции, брендовые ресурсы и адаптеры для поставляемого продукта. Манифест не импортирует внутренние реализации, а связывает только публичные контракты. Это предотвращает превращение ядра в универсальный каталог частных функций.

Компоновщик сформировал 28 допустимых профилей. Все они прошли проверку ограничений. Отклонены все 120 одиночных и 60 смешанных мутаций; на 10 000 случайных манифестах решение совпало с независимым оракулом. Отдельная тестовая выборка снижает риск проверки только на данных, использованных при проектировании правил. Результат подтверждает реализуемость контроля, но не гарантирует корректность произвольной бизнес-конфигурации: валидатор обнаруживает только формализованные правила. Исследования управления вариативностью также подчёркивают необходимость охватывать несколько взаимосвязанных перспектив продукта [3].

Таблица 2. Результаты конфигурационной апробации

Показатель	Значение	Интерпретация
Функциональные MVVM-модули	12	ед.
Подсистемы общего ядра	5	ед.
Допустимые профили	28	7 × 2 платформы × 2 профиля
Проверяемые ограничения	14	7 requires; 2 excludes; 1 cardinality; 4 resources
Одиночные мутации	120/120	по 30 на каждую из 4 категорий
Смешанные мутации	60/60	по 2–3 категории одновременно
Случайная тестовая выборка	10 000	отдельно от контролируемых мутаций
Совпадение с оракулом	10 000/10 000	100 % тестовой выборки
Ложные отказы	0/28	0 % допустимой матрицы
Медианное время проверки	1,3 мкс	CPython 3.12.13, macOS arm64

Расчёт трудоёмкости демонстрирует нелинейный для портфеля эффект. При одном продукте семейная стратегия дороже на 960 чел.-ч, поскольку инфраструктура вариативности ещё не используется повторно. Уже при первом β экономия составляет 2 165 чел.-ч. Для α и шести β отдельные кодовые базы требуют 34 560 чел.-ч, семейная модель — 17 820 чел.-ч; разница равна 16 740 чел.-ч. Включение Hmatrix уменьшает оценку эффекта по сравнению с моделью, в которой стоимость семейной координации ошибочно считается нулевой

Таблица 3. Данные к графику накопленной трудоёмкости

β, n	Раздельно, чел.-ч	Семейство, чел.-ч	Экономия, %
0	5 760	6 720	-16,7
1	10 560	8 395	20,5
2	15 360	10 140	34,0
3	20 160	11 955	40,7
4	24 960	13 840	44,6
5	29 760	15 795	46,9
6	34 560	17 820	48,4
7	39 360	19 915	49,4

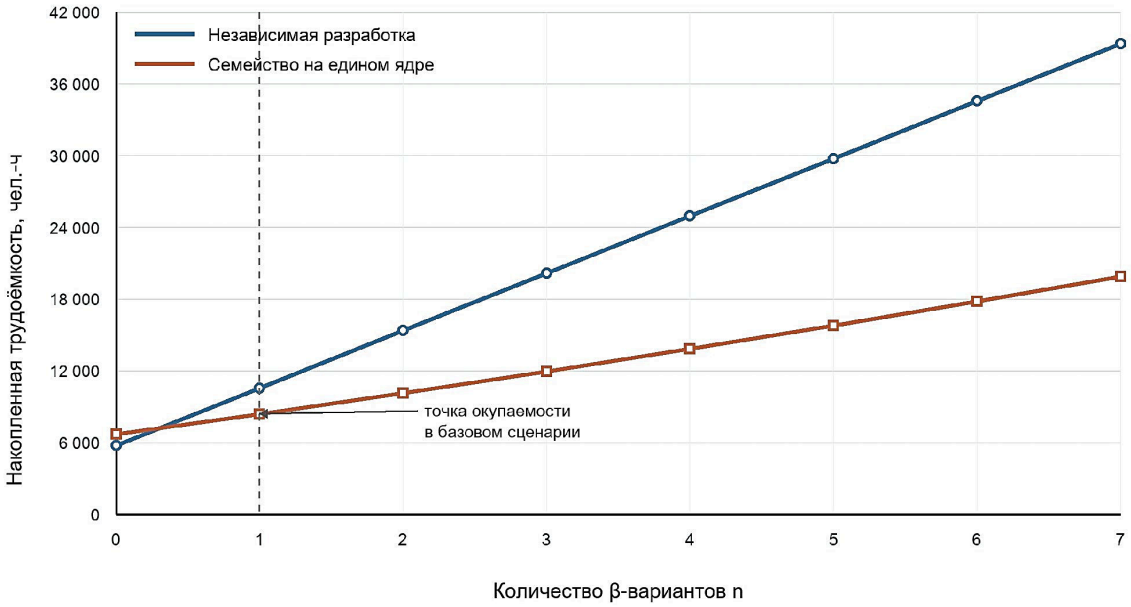


Рисунок 2. Накопленная трудоёмкость двух стратегий

При сценарной полной стоимости часа 3 000 руб. базовая экономия семейства из семи приложений равна 50,22 млн руб. Показатель включает только разработку до первого промышленного релиза и не включает маркетинг, лицензии SDK, комиссию магазинов приложений и эксплуатационную инфраструктуру. Следовательно, он характеризует экономию инженерной мощности, а не прибыль

Модель также объясняет организационный эффект. Общая исправленная функция поставляется один раз и проверяется во всей матрице, тогда как уникальный модуль остаётся в границе своего варианта. Многогранная вариативность требует сочетать несколько механизмов на разной гранулярности [7]; поэтому попытка представить любой отличающийся код одним глобальным feature flag приводит к скрытым зависимостям и увеличению тестового пространства.

Стресс-анализ Монте-Карло показывает зависимость результата от диапазонов исходных оценок. Для α + 6β медианная экономия трудоёмкости равна 25,8 %, 95 %-й интервал — от −9,1 до 48,3 %. Положительный эффект получен в 92,8 % сценариев, отрицательный — в 7,2 %, а экономия свыше 40 % — в 14,2 %. Точка окупаемости пришлась на первый β в 42,3 % сценариев, на второй — в 35,9 %, на третий — в 9,7 %; в 6,7 % сценариев семейная стратегия не окупилась даже к пятнадцатому β. Следовательно, знак эффекта не предопределён границами входных распределений.

Таблица 4. Квантили анализа чувствительности для α + 6β

Квантиль, %	**Экономия трудоёмкости, %**	**Сэкономлено, чел.-ч**	**Экономия, млн руб.**
2,5	-9,1	-2 861	-9,0
25	14,4	4 845	14,9
50	25,8	8 924	27,4
75	35,4	12 674	39,4
97,5	48,3	18 803	61,8

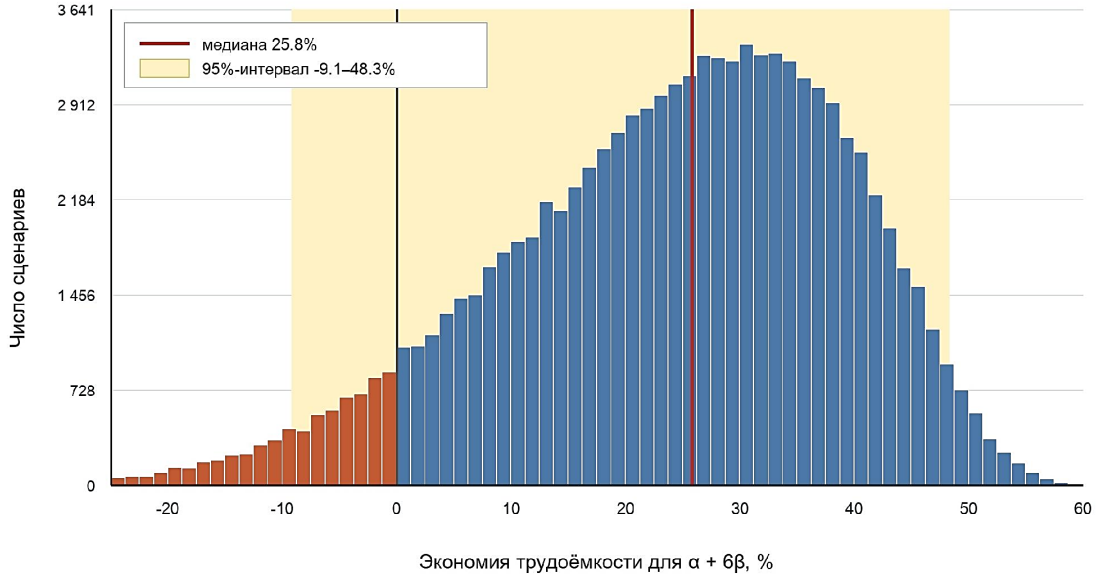


Рисунок 3. Распределение расчётной экономии в 100 000 сценариев

Денежная медиана чувствительного расчёта составляет 27,4 млн руб., а 95 %-й интервал — от −9,0 до 61,8 млн руб. Ширина интервала и отрицательная нижняя граница показывают, что экономическое решение нельзя обосновывать одной точечной оценкой. До перехода к семейству организации следует подставить в модель собственные журналы трудозатрат, стоимость инженерного часа и фактическую долю уникальных функций.

Практический переход целесообразно выполнять поэтапно. Сначала фиксируется матрица общих и вариативных требований; затем из α выделяются контракты и один сквозной модуль; после этого вводятся манифест, статический валидатор и сборка двух продуктов. Массовое выделение абстракций до появления второго потребителя создаёт speculative generality. Напротив, копирование β до фиксации точек вариативности закрепляет расхождение репозиториев. Стандартный цикл domain engineering/application engineering [12] здесь реализуется как минимальный управляемый контур.

Предлагаемая модель не устраняет все расходы. Единое ядро становится общей точкой риска: несовместимое изменение может заблокировать весь портфель. Комбинаторное число конфигураций увеличивает стоимость тестов; потому на каждый коммит запускаются контрактные и попарные проверки, а полная матрица — перед релизом. Владение ядром должно быть явным, а изменения контрактов — версионируемыми. Для очень разных продуктов, имеющих менее половины общих сценариев или независимые регуляторные циклы, отдельные репозитории могут быть экономически рациональнее.

Внешняя валидность ограничена синтетическим портфелем и отсутствием данных фактической эксплуатации. Конструктная валидность ограничена тем, что человеко-часы агрегируют анализ, разработку, тестирование и ревью. Внутренняя валидность зависит от исходных диапазонов, формы распределений и модели зависимости Hα и HF. Наконец, 100 %-е обнаружение относится к 180 сформированным мутациям, а совпадение с оракулом — к реализованному набору правил; эти результаты не доказывают полноту ограничений для

неизвестных дефектов. Поэтому результаты следует интерпретировать как проверку реализуемости и экономического порога, а не как причинное доказательство промышленной экономии.

Дальнейшая апробация должна использовать обезличенные данные нескольких репозиториев: время задачи, число изменённых модулей, повторное открытие дефекта, длительность ревью, количество отклонённых сборок и стоимость сопровождения. Сопоставимые типы изменений следует наблюдать до и после введения манифеста. Современные исследования мобильной генерации также переходят к явному моделированию вариативности архитектурных шаблонов [11], что подтверждает актуальность проверки конфигурации до генерации кода.

Заключение

Разработана модульно-конфигурируемая архитектурная модель, в которой эталонное приложение α становится источником общего MVVM-ядра, а продукты $\beta_1 \ldots \beta_n$ формируются из проверяемого манифеста, функциональных модулей и вариантных адаптеров. Модель разделяет продуктовую вариативность и платформенную специализацию, запрещает глубокие импорты между модулями и переносит контроль совместимости до этапа сборки.

Конфигурационная апробация подтвердила техническую реализуемость: сформированы 28 допустимых профилей; валидатор обнаружил все 120 одиночных и 60 смешанных мутаций без ложного отказа и совпал с независимым оракулом на 10 000 случайных манифестах. В базовом экономическом сценарии $\alpha + 6\beta$ семейная стратегия снижает трудоёмкость с 34 560 до 17 820 чел.-ч, то есть на 48,4 %. При ставке 3 000 руб./ч это соответствует 50,22 млн руб. расчётной инженерной экономии.

Анализ 100 000 сценариев дал медианную экономию 25,8 % и 95 %-й интервал от −9,1 до 48,3 %; отрицательный эффект возник в 7,2 % сценариев. Основной управленческий вывод состоит в наличии порога: первый продукт несёт инвестицию в ядро, а момент окупаемости зависит от доли уникального кода и стоимости семейной матрицы. Решение должно приниматься по собственным данным компании, поскольку представленные рублёвые значения являются модельными.

Полученный результат развивает предыдущую архитектурную работу авторов, но решает другую задачу — не выбор внутренней структуры одного приложения, а формирование и экономическое управление семейством поставляемых продуктов. Следующий этап исследования — квазиэксперимент на нескольких реальных проектах с доверительными интервалами по времени изменений, дефектам и стоимости сопровождения.

Список литературы

1. Гутьеррес-Фернандес А.М., Чакон-Луна А.Е., Бенавидес Д., Фуэнтес Л., Рабизер Р. Gutiérrez-Fernández A.M., Chacón-Luna A.E., Benavides D., Fuentes L., Rabiser R. Variability Management and Software Product Line Knowledge in Software Companies // Journal of Systems and Software. – 2024. – Т. 216. – DOI: 10.1016/j.jss.2024.112114.

2. Панюшкин А.М., Слесарев Р.А. Теоретико-методологическое обоснование сравнительной таксономии архитектур клиентских приложений и апробация модульно-вертикальной конфигурации MVVM [Электронный ресурс]. // Universum: технические науки. URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23207 (дата обращения: 20.07.2026).
3. Aleem S., Capretz L.F., Ahmed F. A Reference Framework for Variability Management of Software Product Lines // Computer and Information Science. – 2023. – № 1. – P. 1–24. – DOI: 10.5539/cis.v16n1p1.
4. Android Developers. Configure build variants [Электронный ресурс]. URL: https://developer.android.com/build/build-variants (дата обращения: 21.07.2026).
5. Apple Developer. Adding a build configuration file to your project [Электронный ресурс]. URL: https://developer.apple.com/documentation/xcode/adding-a-build-configuration-file-to-your-project (дата обращения: 21.07.2026).
6. Boehm B., Brown A.W., Madachy R., Yang Y. A Software Product Line Life Cycle Cost Estimation Model // Proceedings of the. – 2004. – P. 156–164. – DOI: 10.1109/ISESE.2004.1334903.
7. Horcas J.-M., Cortiñas A., Fuentes L., Luaces M.R. Combining Multiple Granularity Variability in a Software Product Line Approach for Web Engineering // Information and Software Technology. – 2022. – DOI: 10.1016/j.infsof.2022.106910.
8. ISO/IEC 26550:2015. Software and systems engineering – Reference model for product line engineering and management. Geneva: ISO, 2015. (confirmed in 2022). – Geneva: ISO, 2022. – 35 P.
9. ISO/IEC 26580:2021. Software and systems engineering – Methods and tools for the feature-based approach to software and systems product line engineering. Geneva: ISO, 2021. 51 P. – Geneva: ISO, 2021. – 51 P.
10. Microsoft. Model-View-ViewModel [Электронный ресурс]. URL: https://learn.microsoft.com/en-us/dotnet/architecture/maui/mvvm (дата обращения: 04.07.2026).
11. Peralta R., Horcas J.-M. Capturing and Exploiting Design Pattern Variability in Mobile Application Generation // arXiv. – 2026.
12. Pohl K., Böckle G., van der Linden F.J. Software Product Line Engineering: Foundations, Principles and Techniques. – Berlin: Springer, 2005. – 467 P.
13. React Native. Platform-Specific Code [Электронный ресурс]. URL: https://reactnative.dev/docs/platform-specific-code.html (дата обращения: 21.06.2026).

References

1. Gutiérrez-Fernández A.M., Chacón-Luna A.E., Benavides D., Fuentes L., Rabiser R. Gutiérrez-Fernández A.M., Chacón-Luna A.E., Benavides D., Fuentes L., Rabiser R. Variability Management and Software Product Line Knowledge in Software Companies // Journal of Systems and Software. – 2024. – Vol. 216. – DOI: 10.1016/j.jss.2024.112114.

2. Panyushkin A.M., Slesarev R.A. [Theoretical and Methodological Foundations of a Comparative Taxonomy of Client Application Architectures and Evaluation of a Modular Vertical MVVM Configuration]. Universum: tekhnicheskie nauki. 2026. Available at: [Электронный ресурс]. – No. 7 (148). – URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23207 (accessed: 20.07.2026). (In Russ.).
3. Aleem S., Capretz L.F., Ahmed F. A Reference Framework for Variability Management of Software Product Lines. Computer and Information Science. 2023. Vol. 16, No. 1. P. 1–24. DOI: 10.5539/cis.v16n1p1.
4. Android Developers. Configure build variants. Available at: [Электронный ресурс]. – URL: https://developer.android.com/build/build-variants (accessed: 21.07.2026).
5. Apple Developer. Adding a build configuration file to your project. Available at: [Электронный ресурс]. – URL: https://developer.apple.com/documentation/xcode/adding-a-build-configuration-file-to-your-project (accessed: 21.07.2026).
6. Boehm B., Brown A.W., Madachy R., Yang Y. A Software Product Line Life Cycle Cost Estimation Model // Proceedings of the. – 2004. – P. 156–164. – DOI: 10.1109/ISESE.2004.1334903.
7. Horcas J.-M., Cortiñas A., Fuentes L., Luaces M.R. Combining Multiple Granularity Variability in a Software Product Line Approach for Web Engineering. Information and Software Technology. 2022. Vol. 148. 106910. DOI: 10.1016/j.infsof.2022.106910.
8. ISO/IEC 26550:2015. Software and systems engineering – Reference model for product line engineering and management. Geneva: ISO, 2015. (confirmed in 2022). – Geneva: ISO, 2022. – 35 P.
9. ISO/IEC 26580:2021. Software and systems engineering – Methods and tools for the feature-based approach to software and systems product line engineering. Geneva: ISO, 2021. 51 P. – Geneva: ISO, 2021. – 51 P.
10. Microsoft. Model-View-ViewModel. Available at: [Электронный ресурс]. – URL: https://learn.microsoft.com/en-us/dotnet/architecture/maui/mvvm (accessed: 04.07.2026).
11. Peralta R., Horcas J.-M. Capturing and Exploiting Design Pattern Variability in Mobile Application Generation. arXiv. 2026. arXiv:2607.15099.
12. Pohl K., Böckle G., van der Linden F.J. Software Product Line Engineering: Foundations, Principles and Techniques. – Berlin: Springer, 2005. – 467 P.
13. React Native. Platform-Specific Code. Available at: [Электронный ресурс]. – URL: https://reactnative.dev/docs/platform-specific-code.html (accessed: 21.06.2026).

Статья поступила в редакцию: 10.11.2026
Статья принята к публикации: 18.11.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 004.652.5:004.75:004.738.5

DOI: 10.32743/UniTech.2026.152.11.23751

Частичная репликация данных при обработке интенсивных потоков запросов к html/xml серверу ООСУБД НИКА

Тищенко Владимир Александрович
канд. техн. наук
Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, Православный Свято-Тихоновский гуманитарный университет
Российская Федерация, г. Москва
E-mail: vatischenko@frccsc.ru

Partial data replication when processing intensive requests streams to the xml/ html server of OODMS NIKA

Tishchenko Vladimir Alexandrovich
candidate of technical sciences
Federal Research Center «Computer Science and Control» of the Russian Academy of Sciences
St. Tikhon's Orthodox University for the Humanities
Russian Federation, Moscow

Аннотация

Рассматриваются способы модернизации текущей архитектуры запросов к ООБД НИКА в онлайн-режиме с использованием частичной репликации. Метод контейнеризации контекста запроса с использованием оперативной памяти для обеспечения потокобезопасности изолирует запросы к существующему шлюзу доступа к БД НИКА. Метод основан на CGI-интерфейсе и требует накладных расходов на создание процесса и открытие БД. Трехслойная гибридная архитектура интерфейса с HTTP-сервером на основе ISAPI, именованным каналом (Named Pipe) и сервером запросов преодолевает этот недостаток. Ускоряющим фактором является также сохранение результатов запросов в виде реплик, материализованных на дисковой подсистеме. Для идентификации реплик по полному имени файла при его формировании используются координата объекта запроса, логическое выражение с атрибутами запроса и хэш-функция FNV-1a от последовательности значений атрибутов запроса и их длин. Такая архитектура позволяет перевести время отклика интерфейса в субсекундный диапазон. Сравнение разных моделей работы системы производится на примере тяжелых запросов, включающих в себя универсальные поисковые предикаты. В результате модернизации архитектуры время ответа на запрос сократилось не

Библиографическое описание: Тищенко В.А. Частичная репликация данных при обработке интенсивных потоков запросов к html/xml серверу ООСУБД НИКА // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23751

менее чем на порядок. В качестве примера рассматривается запрос к БД «За Христа пострадавшие», в котором атрибуту присвоено значение маски, порождающей полный перебор значений — ГодАреста=1937 & МестоАреста=*. Время ответа на такой запрос в исходном методе достигало ~1900 мс, а после модернизации стало порядка 150 мс.

Abstract

Ways to modernize the current architecture of queries to the NIKA OODB in online mode using partial replication are considered. The method of containerizing the request context using RAM to ensure thread safety isolates requests to the existing access gateway to the NIKA database. The method is based on a CGI interface and requires overhead for creating a process and opening a database. A three-layer hybrid interface architecture with an ISAPI-based HTTP server, a Named Pipe, and a request server overcomes this disadvantage. An accelerating factor is also the saving of query results in the form of replicas materialized on the disk subsystem. To identify replicas by the full file name during its formation, the coordinate of the request object, a logical expression with the request attributes, and the FNV-1a hash function of the sequence of request attribute values and their lengths are used. This architecture allows the interface response time to be reduced to the subsecond range. A comparison of different system operating models is conducted using complex queries that incorporate universal search predicates. As a result of the architectural upgrade, query response time improved by at least an order of magnitude. One example considered is a query to the “Those Who Suffered for Christ” (previously referred to as “for Christ suffered”), where an attribute is given a wildcard value resulting in a full enumeration of values — namely, `YearOfArrest=1937 & PlaceOfArrest=*`. With the original method, the response time for such a query reached ~1900 ms, whereas following the upgrade, it was reduced to approximately 150 ms.

Ключевые слова: запросный шлюз к ООБД НИКА, контейнеризация контекста запроса, интерфейс ISAPI, именованные каналы, реплики запросов, частичная репликация данных, оптимизация времени отклика.

Keywords: request gateway to NIKA ODB, containerization of request context, ISAPI interface, named pipes, query replicas, partial data replication, response time optimization.

Введение

Использование графовых СУБД [11] в современных информационно-поисковых системах, работающих в режиме онлайн, требует субсекундного времени отклика. В отличие от реляционных, современные графовые СУБД Neo4j [5] и TigerGraph [8] не имеют тяжелых операций слияния таблиц и работают с данными через указатели в оперативной памяти. ООСУБД НИКА [1] относится к классической графовой СУБД, модель которой представляет собой сеть с выделенными иерархиями вершин и инвертированным индексом. Для выполнения запросов к БД НИКА по сети интернет используется шлюз, работающий через http-сервер. Для ускорения откликов шлюза, работающего в непрерывном он-лайн режиме, требуется модернизация его архитектуры.

Запросы с использованием универсальных поисковых предикатов типа attribute=* при высокой плотности семантических связей в БД НИКА может приводить к большим переборам значений и увеличению времени отклика. Ключевым моментом в уменьшении

времени отклика шлюза является использование реплик. В современных СУБД реплики применяются для ускорения выполнения аналитических запросов [4]. В контексте проблемы шлюза запросов реплика создается как результат материализации ответа на данный запрос. При повторении тех же запросов шлюз не запускает запросы заново, а использует сохраненные реплики.

Материалы и методы

В исходной архитектуре работы в интернет запросной системы СУБД НИКА используется CGI-программа request.exe, в которой при каждом запросе выполняются три шага. Вначале происходит инициализация, включающая в себя создание самого шлюзового процесса, выделение памяти под буферы, открытие БД, затем выполняется сам запрос и отписывается результат запроса, в конце происходит деинициализация — освобождение памяти и закрытие БД.

$$T_{resp} = T_{init} + T_{req} + T_{uninit}$$

Ставится задача минимизировать общее время T_{resp}->min.

Метод контейнеризации контекста транзакций для обеспечения потокобезопасности. Для ускорения времени отклика используемого шлюза request.exe [2] может быть использована двухслойная архитектура на основе CGI-интерфейса, с контейнеризацией контекста запроса. Для изоляции контекстов разных запросов используется следующая стратегия. При поступлении запроса к БД http-сервер вызывает модуль-обертку RunRequest. Модуль генерирует уникальный идентификатор *id* сессии и контейнера, формирует изолированную директорию-контейнер во временной директории <*tmp-path*>\ctx-<*id*>. Вызывает программу запроса в виде командной строки с инкапсулированными параметрами в созданном контейнере и при этом передает ей переменные окружения в исходном виде. После выполнения запроса RunRequest передает результаты запроса http-серверу и материализует локальный файл ответа, сохраняя его в виде частичной реплики (блок материализация представлений на рис.1).

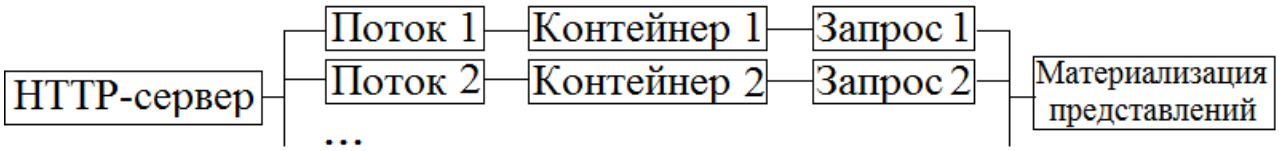


Рисунок 1. Схема создания частичных реплик

Рассмотренная архитектура близка к исходной, но минимизирует время отклика T_{resp} за счет создания нового файла результата запроса в уникальном контейнере на RAM-диске в отличие от прежней архитектуры, которая перезаписывала существующий файл на дисковой системе. Кроме того, если тот же запрос запускается повторно, то он не выполняется заново, а в ответ отображается созданная ранее реплика из хранилища представлений.

Трехслойная гибридная архитектура интерфейса с http-сервером. Вместо использования классического CGI или громоздких сторонних протоколов, сложная задача снижения задержек и обеспечения потокобезопасности была разложена на три идеально подходящих слоя, образующих чистую и гибкую гибридную архитектуру:

1. Слой интеграции на уровне прикладного программного интерфейса интернет-сервера (HTTP-сервер и ISAPI). На стороне HTTP-сервера запускается легковесная библиотека RunRequest.dll, реализованная в виде ISAPI-расширения. Использование библиотеки, загруженной непосредственно в адресное пространство HTTP-сервера, полностью ликвидирует накладные расходы на создание процессов (CreateProcess), дублирование переменных окружения и работу с медленными анонимными каналами.

2. Слой межпроцессного взаимодействия (IPC). Передача данных между HTTP-сервером и СУБД осуществляется через локальные именованные каналы (Named Pipes). Это обеспечивает максимально быструю, потокобезопасную передачу контекста запросов в оперативной памяти с минимальной системной задержкой ядра ОС.

3. Слой исполнения и изоляции (Служба RunRequestServer). Выделенный процесс RunRequestServer.exe запущен в режиме реального времени в сессии 0 ОС Windows. Многопоточный сервер принимает параллельно запросы через именованный канал от HTTP-сервера посредством RunRequest.dll. При поступлении запроса через именованный канал передаются параметры запроса — объект запроса и ограничения на атрибуты в виде логического выражения. В ответ на запрос сервер генерирует уникальный *id* сессии и разворачивает изолированный контекст запроса в RAM-контейнере (<*tmp-path*>\ctx-<*id*>), гарантируя полную потокобезопасность выполнения кода СУБД. После выполнения запроса сервер создает реплику запроса так, что при повторном запросе он не запускается заново.

Таким образом, сервер запросов RunRequestServer полностью охватывает преимущества шлюза RunRequest, минимизируя T_{resp}, и добавляет к ним новые. Время ответа на запрос сокращается до времени выполнения запроса и отображения ответа на запрос, а инициализация (T_{init}) и деинициализация (T_{uninit}) происходят один раз при запуске и останове сервера соответственно: $T_{resp} = T_{req}$.

Способ построения репликации. С точки зрения архитектуры частичная репликация представляет собой кэширование через материализацию представлений. Метод репликации переводит ресурсоемкую задачу поиска в класс задач прямого навигационного вывода. Для идентификации реплик используется координата объекта [3] запроса к БД и набор ограничений на атрибуты. Результат запроса – это файл БД НИКА с выбранными ключами объектами из БД, которые удовлетворяют ограничениям, наложенным на атрибуты БД. Полный путь к файлу реплики формируется следующим образом. 1 уровень — путь к файлу в файловой системе на диске задает координата объекта запроса. 2 уровень — файл с репликой располагается в директории с названием, составленным из логического выражения запроса, исключая значения атрибутов. 3 уровень — название файла реплики вычисляется как 64-битное значение беззнаковой хэш-функции FNV-1a [9] от строки, составленной из последовательности пар значений атрибутов в логическом выражении и их

длин в байтах: $V_1{:}L_1|V_2{:}L_2|\ldots|V_n{:}L_n$, что обеспечивает взаимно однозначное соответствие между множеством значений и составленной из них строкой. Здесь значение хэш-функции FNV-1a от строки $s=c_1c_2\ldots c_L$, $L=|s|$ вычисляется по формуле:

$$f(s) = ((\ldots\ ((B_0 \oplus c_1) \times P \oplus c_2) \times P \oplus \ldots \oplus c_L) \times P)\ \ mod\ 2^{64}$$

Здесь символ операции ⊕ обозначает побитовое исключающее ИЛИ. Для 64-битных значений базовое смещение B_0=14.695.981.039.346.656.037 и простое число FNV P=1.099.511.628.211.

Режимы синхронизации и обеспечения согласованности частичных реплик: периодический сброс и обновление реплик по таймеру, очистка при глобальном обновлении БД, точечные обновления на основе координат изменившихся объектов в БД.

Результаты и обсуждение

Представляет интерес сравнение времен откликов и анализ эффективности. Анализ задержек ядра СУБД показывает, что поиск с избыточными масками * через стандартный механизм занимает ~1.9с (см. таблицу 1) из-за интенсивного случайного дискового ввода-вывода при десериализации объектных графов с нуля. Введение частичной репликации снижает эту вычислительную сложность, приближая время обработки к чистой навигационной скорости (<100 мс).

Сервер RunRequestServer ликвидировал системные накладные расходы запуска CGI-программы. Классическая CGI-программа увеличивала время за счет «холодного» отклика в 2,5 раза (до 400 мс в режиме онлайн против 150 мс в консоли). Разработанная гибридная ISAPI-архитектура полностью устраняет накладные расходы HTTP-сервера, снижая задержку онлайн-вызова до физического минимума (~150 мс), что сопоставимо с пиковыми показателями современных резидентных графовых СУБД.

Рассмотрим тяжелый запрос к БД «За Христа пострадавшие» (36442 персоналии, 220MB): объект — Дела.ПЕРИОДЫ ЖИЗНИ.Аресты, логическое выражение — ГодАреста=1937 & МестоАреста=*. В таблице 1 T — время выполнения для первого и повторного запросов, RPS — пропускная способность в стресс-тесте 100 запросов, 20 потоков без реплики и с репликой. Стенд: Intel Core i7-10700 (8 ядер) / 16 ГБ ОЗУ / Windows x64 / Apache 2.4.67.

Таблица 1. Сравнение производительности архитектурных решений

Архитектура	Обработка	T перв./повт., мс	RPS запр./репл.
Исходный CGI (request.exe)	Дисковый поиск с нуля (Random I/O на HDD/SSD). Прямой вызов CreateProcess, анонимные каналы stdin/stdout	~1900/~1300	0.53 (только 1 поток)
CGI-обертка (RunRequest.exe + RAM-диск)	Дисковый поиск с нуля для первого запроса, с изоляцией контекста в ОЗУ (RAM-диск). Вызов через модуль-обертку CGI, сохраняется создание процессов	~400 / <100	19 / 62 (измерено, 20 потоков)

Архитектура	Обработка	T перв./повт., мс	RPS запр./репл.
Гибридная архитектура (ISAPI + Репликация)	Материализованные представления (Прямой навигационный вывод). Легковесная dll + Named Pipes + Сервис RunRequestServer	~150 / <100	45 / 135 (модель, 20 потоков)

В сервере запросов сохраняется унаследованное ядро ООСУБД НИКА без рискованной миграции данных. В отличие от универсальных СУБД, оптимизированных для плоских реляционных структур, специализированные историко-биографические ИПС на базе ООСУБД НИКА ориентированы на обработку графовых иерархических метаданных с высокой плотностью семантических связей, что изначально накладывает иные системные ограничения на скорость динамического синтеза документов.

Прямое сравнение абсолютного времени поиска программы request.exe (~1.9 с) в случае запросов с масками * с субсекундными показателями современных универсальных поисковых систем, таких как Elasticsearch [10] или Apache Solr [7], требует учета специфики архитектуры хранения данных. В современных системах общего назначения высокая скорость обработки избыточных поисковых предикатов (с масками *) достигается за счет постоянного кэширования инвертированных индексов в ОЗУ в виде специализированных сжатых структур (например, битовых карт Roaring).

Предложенный метод частичной репликации позволяет полностью обойти эту алгоритмическую сложность: он переводит задачу поиска в класс задач прямого навигационного вывода, стабилизируя время отклика на уровне менее 100 мс, что полностью соответствует современным стандартам интерфейсов в интернет.

Необходимо отметить, что в классе современных графовых СУБД (например, Neo4j, TigerGraph) субсекундная задержка при обходе сложных структур достигается за счет реализации концепции безиндексной смежности (Index-Free Adjacency) [6] и удержания графа связей в резидентной оперативной памяти. Специализированная ООСУБД НИКА, являясь представителем объектно-ориентированных систем, при вычислении поисковых предикатов использует традиционные инвертированные индексы, что при обработке избыточных масок приводит к нелинейному росту дисковых операций.

Заключение

Полная миграция данных унаследованных историко-биографических систем в современные графовые СУБД технически нецелесообразна, так как повлечет за собой разрушение специфических объектно-документных связей и потребует полного переписывания прикладного программного обеспечения. В этих условиях предложенный метод внешней частичной репликации выступает как архитектурно инвариантное и экономически эффективное решение. Он позволяет, не затрагивая унаследованное ядро СУБД НИКА и не прибегая к миграции данных, обеспечить субсекундное время отклика веб-интерфейса (первый запрос ~150 мс, повторный <100 мс), сопоставимое с характеристиками современных графовых систем хранения.

Разработанная гибридная архитектура демонстрирует, как декомпозиция сложной системной проблемы на три специализированных слоя (ISAPI → Named Pipes → RunRequestServer) в сочетании с алгоритмом частичной репликации позволяет вдохнуть новую жизнь в унаследованные системы, обеспечивая им современную субсекундную производительность.

Список литературы

1. Емельянов, Н.Е. Представление гипертекста в СУБД НИКА / Н.Е. Емельянов, В.А. Тищенко // Технология программирования и хранения данных: сборник трудов Института системного анализа Российской академии наук / под редакцией В.Л. Арлазарова, Н.Е. Емельянова. – Москва: ИСА РАН, 2009. – Т. 45. – С. 17–36.
2. Емельянов, Н.Е. Реализация запросной системы на основе XPath для ООСУБД НИКА / А.С. Богданов, Н.Е. Емельянов, В.И. Ерохин, Б.Л. Романов // Труды ИСА РАН. – Москва: Едиториал УРСС, 2003. – С. 130–146.
3. Емельянов, Н.Е. Методы отображения объектов для построения web-сервера объектно-ориентированной базы данных / Н.Е. Емельянов, В.А. Тищенко // Развитие безбумажных технологий в организационных системах: сборник трудов ИСА РАН / под редакцией В.Л. Арлазарова, Н.Е. Емельянова. – Москва: URSS, 1999. – С. 96–109.
4. Соловьев, А.В. H2TAP технология в преломлении к префиксному дереву PTOLAP и агрегирующим запросам к БД НИКА / А.В. Соловьев, В.А. Тищенко // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2026. – № 3. – С. 61–72. – DOI: 10.14357/20718632260306.
5. Angles, R. PG-Schema: Schemas for Property Graphs / R. Angles, A. Bonifati, S. Dumbrava [et al.] // Proceedings of the ACM on Management of Data. – 2023. – Т. 1, № 2. – Art. 198. – DOI: 10.1145/3589778.
6. Besta, M. Demystifying Graph Databases: Analysis and Taxonomy of Data Organization, System Designs, and Graph Queries / M. Besta, R. Gerstenberger, E. Peter, M. Fischer, M. Podstawski, C. Barthels, G. Alonso, T. Hoefler // ACM Computing Surveys. – 2023. – Т. 56, № 2. – DOI: 10.1145/3604932.
7. Class ReversedWildcardFilterFactory [Электронный ресурс]. // Apache Solr 10.1.0 Core API: [официальная документация]. – 2026. URL: https://solr.apache.org/docs/10_1_0/core/org/apache/solr/analysis/ReversedWildcardFilterFactory.html (дата обращения: 12.11.2026).
8. Deutsch, A. Aggregation Support for Modern Graph Analytics in TigerGraph / A. Deutsch, Y. Xu, M. Wu, V.E. Lee // SIGMOD '20: Proceedings of the. – New York: ACM, 2020. – P. 377–392. – DOI: 10.1145/3318464.3386144.
9. Fowler, G. The FNV Non-Cryptographic Hash Algorithm: RFC 9923 / G. Fowler, L.C. Noll, K.-P. Vo, D. Eastlake 3rd. – IETF [Электронный ресурс]. – 2026. URL: https://www.rfc-editor.org/info/rfc9923 (дата обращения: 12.11.2026).
10. Kumar, R. Query Optimization in Elasticsearch: A Comparative Analysis of Ranking Strategies / R. Kumar // International Journal for Multidisciplinary Research (IJFMR). – 2024. – Т. 6. URL: https://www.ijfmr.com/research-paper.php?id=38173 (дата обращения: 12.11.2026).

11. Rusu F., Huang Z. In-Depth Benchmarking of Graph Database Systems with the Linked Data Benchmark Council (LDBC) Social Network Benchmark (SNB) [Электронный ресурс]. // arXiv. – 2019. URL: https://arxiv.org/abs/1907.07405 (дата обращения: 11.11.2026).

References

1. Emelyanov N.E. Representation of hypertext in the NIKA DBMS / N.E. Emelyanov, V.A. Tishchenko // Technology of programming and data storage / Sat. Proceedings of the ISA RAS. V.45. Ed. Corresponding Member RAS Arlazarov V.L. and Doctor of Technical Sciences prof. Emelyanov N.E. – 2009. – P. 17–36.
2. Emelianov N.E. Implementation of a query system based on XPath for the OODBMS NIKA / A.S. Bogdanov, N.E. Emelianov, Erokhin V.I., Romanov B. L // Organizational management and artificial intelligence. Proceedings of the ISA RAS. Ed. by Doctor of Technical Sciences prof. Arlazarov V.L. and d. – 2003. – P. 130–146.
3. Emelyanov N.E. Object Mapping Methods for Building a Web Server of an Object-Oriented Database. / N.E. Emelyanov, V.A. Tishchenko In: Arlazarov V.L., Emelyanov N.E. (eds.) Development of Paperless Technologies in Organizational Systems (Razvitie bezbumazhnykh tekhnologiy v organizatsionnykh sistemakh) // Proceedings of ISA RAS. Moscow, URSS Publ. – 1999. – P. 96–109. (In Russ.).
4. Solovyev A.V. H2TAP technology in refraction to the PTOLAP prefix tree and aggregation queries to the NIKA database / A.V. Solovyev, V.A. Tishchenko // Information Technologies and Computing Systems. – 2026. – No. 3. – P. 61–72. – DOI: 10.14357/20718632260306.
5. Angles, R. PG-Schema: Schemas for Property Graphs / R. Angles, A. Bonifati, S. Dumbrava [et al.] // Proceedings of the ACM on Management of Data. – 2023. – Vol. 1, No. 2. – Art. 198. – DOI: 10.1145/3589778.
6. Besta, M. Demystifying Graph Databases: Analysis and Taxonomy of Data Organization, System Designs, and Graph Queries / M. Besta, R. Gerstenberger, E. Peter, M. Fischer, M. Podstawski, C. Barthels, G. Alonso, T. Hoefler // ACM Computing Surveys. – 2023. – Vol. 56, No. 2. – DOI: 10.1145/3604932.
7. Class ReversedWildcardFilterFactory [Электронный ресурс]. // Apache Solr 10.1.0 Core API: [official documentation]. – 2026. – URL: https://solr.apache.org/docs/10_1_0/core/org/apache/solr/analysis/ReversedWildcardFilterFactory.html (accessed: 12.11.2026).
8. Deutsch, A. Aggregation Support for Modern Graph Analytics in TigerGraph / A. Deutsch, Y. Xu, M. Wu, V.E. Lee // SIGMOD '20: Proceedings of the. – New York: ACM, 2020. – P. 377–392. – DOI: 10.1145/3318464.3386144.
9. Fowler, G. The FNV Non-Cryptographic Hash Algorithm: RFC 9923 / G. Fowler, L.C. Noll, K.-P. Vo, D. Eastlake 3rd. – IETF [Электронный ресурс]. – 2026. – URL: https://www.rfc-editor.org/info/rfc9923 (accessed: 12.11.2026).
10. Kumar, R. Query Optimization in Elasticsearch: A Comparative Analysis of Ranking Strategies // International Journal for Multidisciplinary Research (IJFMR). – 2024. – Vol. 6 [Электронный ресурс]. – URL: https://www.ijfmr.com/research-paper.php?id=38173 (accessed: 12.11.2026).

11. Rusu F., Huang Z. In-Depth Benchmarking of Graph Database Systems with the Linked Data Benchmark Council (LDBC) Social Network Benchmark (SNB) [Electronic resource]. // arXiv. – 2019. – URL: https://arxiv.org/abs/1907.07405 (accessed: 11.11.2026).

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

Статья поступила в редакцию: 10.11.2026
Статья принята к публикации: 18.11.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 004.8+004.9

DOI: 10.32743/UniTech.2026.152.11.23750

Методика адаптивной маршрутизации запросов между рекомендательной моделью и языковым агентом с учётом качества и вычислительных затрат

Баринов Константин Вячеславович
исполнительный директор
по исследованию данных, ПАО Сбербанк
Российская Федерация, г. Москва
E-mail: milova.ts@ya.ru

A method for adaptive request routing between a recommendation model and a language agent under quality and computational cost constraints

Barinov Konstantin Vyacheslavovich
Executive Director for Data Research
Sberbank of Russia PJSC
Russian Federation, Moscow

Аннотация

Цель исследования состоит в разработке процедуры выбора исполнителя в гибридной рекомендательной системе при ограниченном бюджете обработки запросов. Выбор производится между специализированной рекомендательной моделью и агентом на основе большой языковой модели. Методика связывает признаки запроса, прогноз дополнительного качества и допустимую стоимость исполнения. Для пакетной обработки получено правило распределения квоты при постоянной дополнительной стоимости. Указаны условия его применимости и граница потери качества при ошибке прогнозирования. Проверка выполнена в десяти независимых запусках синтетического эксперимента с тремя значениями бюджета. В каждом запуске использованы двенадцать тысяч обучающих и восемь тысяч тестовых запросов. Сопоставлены случайная маршрутизация, эвристика достаточности истории, обучаемая политика, её упрощённый вариант и выбор по известным вероятностям успеха. При среднем бюджете шесть условных единиц обучаемая политика достигла ожидаемой успешности 75,43 % против 68,68 % у случайной стратегии. Средний выигрыш составил 6,75

Библиографическое описание: Баринов К.В. Методика адаптивной маршрутизации запросов между рекомендательной моделью и языковым агентом с учётом качества и вычислительных затрат // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23750

процентного пункта. Добавление взаимодействий признаков не дало убедительного преимущества. Практическая ценность методики заключается в воспроизводимом сравнении вариантов расходования вычислительного бюджета. Полученные числа относятся к искусственно заданным вероятностям и не характеризуют качество конкретной языковой модели. Для применения к пользовательским данным необходимы измерение полной стоимости и проверка процедуры при неполной обратной связи.

Abstract

The study develops an executor-selection procedure for a hybrid recommendation system operating under a limited request-processing budget. Selection is made between a specialized recommendation model and a large language model agent. The method links request features, predicted incremental quality, and permissible execution cost. For batch processing, a quota-allocation rule is derived under constant incremental cost. Its applicability conditions and a quality-loss bound under prediction error are stated. Evaluation comprises ten independent synthetic runs at three budget levels. Each run uses twelve thousand training requests and eight thousand test requests. Random routing, a history-sufficiency heuristic, a learned policy, its reduced-feature version, and an oracle using known success probabilities are compared. At an average budget of six arbitrary units, learned routing achieves expected success of 75.43 %, compared with 68.68 % for random allocation. The mean gain is 6.75 percentage points. Feature interactions provide no convincing improvement. The practical value of the method is a reproducible comparison of computational budget allocations. The reported values concern artificially specified probabilities and do not measure any particular language model. Application to user data requires full-cost measurement and evaluation under partially observed feedback.

Ключевые слова: рекомендательная система, языковой агент, маршрутизация запросов, вычислительный бюджет, прирост качества, синтетический эксперимент.

Keywords: recommender system, language agent, request routing, computational budget, quality gain, synthetic experiment.

Введение

Специализированная рекомендательная модель оценивает кандидатов по обученной функции. Языковой агент может дополнительно уточнять запрос, обращаться к каталогу и менять решение после ответа инструмента. Постоянное использование агента оплачивается и тогда, когда эти операции не меняют рекомендацию. Полный отказ от него исключает дополнительную обработку даже для запросов, на которых выбранная модель ошибается.

Выбор базового рекомендателя влияет на постановку задачи. Neural Collaborative Filtering обучает нелинейную функцию взаимодействия пользователя и объекта [4]. LightGCN использует граф взаимодействий [3], SASRec учитывает последовательность действий [5]. После замены рекомендателя преимущество агентной ветви требуется оценить заново. Маршрутизатор обучается относительно конкретного исполнителя, а не абстрактного класса моделей.

Обзор языковых моделей для рекомендаций охватывает извлечение признаков, генерацию и уточнение предпочтений [9]. В агентных архитектурах выделяются профиль, память, планирование и действие [8]. Связь этих компонентов с рекомендациями и поиском рассмотрена в [10]. Для обслуживания запросов важны условия, при которых дополнительные возможности оправдывают расход.

Экономное использование моделей исследуется в FrugalGPT [1] и RouteLLM [7]. FrugalGPT включает каскады языковых моделей, RouteLLM обучает выбор между более сильной и более дешёвой моделями по предпочтениям ответов. Здесь сравниваются исполнители разного типа: специализированный рекомендатель и агент с инструментами. Их качество определяется общей задачей подбора, а не убедительностью текста.

Цель работы состоит в описании процедуры, которая прогнозирует дополнительное качество агента и распределяет ограниченный бюджет. Общий принцип маршрутизации не объявляется новым. Рассматривается его конкретизация в виде оптимизационной модели с условиями применимости и контролируемым вычислительным примером.

Основная гипотеза H1: если прирост качества агента относительно рекомендателя неоднороден по запросам, то при одинаковом бюджете B политика, распределяющая агентные вызовы по прогнозу прироста $\Delta\hat{\mu}(x)$, обеспечивает более высокое ожидаемое качество Q, чем случайное распределение той же квоты и эвристика наименьшей достаточности истории. Гипотеза H1 считается подтверждённой в рассматриваемой среде, если при B = 6 у.е. нижние границы парных 95 %-х интервалов для обеих разностей качества положительны, а при B = 3 и B = 10 у.е. средние разности имеют тот же знак. Дополнительная гипотеза H2: учёт взаимодействий признаков hs и sk повышает Q при B = 6 у.е.; она считается подтверждённой при положительной нижней границе аналогичного интервала.

Материалы и методы

Условные обозначения

x: вектор признаков запроса, доступных до выбора исполнителя; $x \in X$; x_i: признаки i-го запроса пакета, i = 1, …, n.

a: действие; a = 0 означает рекомендательную модель, a = 1 означает агента; $a \in \{0, 1\}$.

Y(a): бинарный потенциальный исход при действии a; Y(a) = 1 при выполнении критерия успеха; $Y(a) \in \{0, 1\}$.

$\mu_a(x) = E[Y(a) \mid x]$: условная вероятность успеха ветви a; $\mu_a(x) \in [0, 1]$, безразмерная. $\hat{\mu}_a(x)$: её оценка по обучающим данным.

$\Delta\mu(x) = \mu_1(x) - \mu_0(x)$: прирост качества при вызове агента; $\Delta\mu(x) \in [-1, 1]$. $\Delta\hat{\mu}(x) = \hat{\mu}_1(x) - \hat{\mu}_0(x)$: прогноз прироста; $\Delta\mu_i$, $\Delta\hat{\mu}_i$: те же величины для x_i.

$c_0(x)$, $c_1(x)$: стоимость исполнения запроса рекомендательной ветвью и агентной ветвью; $c_0(x), c_1(x) \geq 0$, у.е. на запрос.

$c_r(x)$: стоимость маршрутизатора и общих предварительных вычислений, которые выполняются при любом выборе; $c_r(x) \geq 0$, у.е. на запрос.

$\Delta c(x) = c_1(x) - c_0(x)$: дополнительная стоимость вызова агента; в работе $\Delta c(x) > 0$, у.е. на запрос.

$\pi(x)$: потоковая политика, вероятность вызова агента для запроса с признаками x; π: $X \to [0, 1]$. П: множество допустимых потоковых политик, то есть всех измеримых функций $X \to [0, 1]$.

$z = (z_1, \ldots, z_n)$: пакетное решение; $z_i = 1$ означает вызов агента для i-го запроса; $z \in \{0, 1\}^n$.

$Q(\pi)$: ожидаемое качество политики, средняя по потоку вероятность успеха; $Q(\pi) \in [0, 1]$, в таблицах выражается в процентах. $Q_n(z)$: то же для пакета.

$C(\pi)$: ожидаемая средняя стоимость обработки одного запроса; $C(\pi) \geq 0$, у.е. на запрос. $C_n(z)$: то же для пакета.

B: бюджет, допустимая средняя стоимость обработки одного запроса; $B \geq 0$, у.е. на запрос.

λ: множитель Лагранжа бюджетного ограничения, цена единицы стоимости в единицах качества; $\lambda \geq 0$, доля успеха на у.е.

n: число запросов в пакете, натуральное число. q: квота, наибольшее допустимое по бюджету число агентных исполнений в пакете; $q \in \{0, 1, \ldots, n\}$.

ε: равномерная граница ошибки прогноза прироста, $|\Delta\hat{\mu}_i - \Delta\mu_i| \leq \varepsilon$; $\varepsilon \geq 0$, безразмерная.

Q^*, $\hat{Q}$: среднее по пакету истинное качество оптимального решения z^* и решения $\hat{z}$, выбранного по прогнозам; $Q^*, \hat{Q} \in [0, 1]$.

$\sigma(t)$: логистическая функция; $t \in \mathbb{R}$, $\sigma(t) \in (0, 1)$. h, s, d, k: синтетические признаки, равномерно распределённые на [0, 1].

Постановка задачи

Пусть x содержит признаки, доступные до выбора исполнителя. Действие $a = 0$ означает использование рекомендательной модели, $a = 1$ означает использование агента. Для обеих ветвей фиксируются одинаковые каталог, запрос и критерий успеха. Бинарный потенциальный исход Y(a) равен единице при выполнении критерия, его условное среднее обозначается $\mu_a(x) = E[Y(a) \mid x]$.

Критерий задаётся до эксперимента. Им может служить рекомендация релевантного объекта при выполнении всех обязательных условий запроса. Клик, удовлетворённость и экспертная релевантность не являются взаимозаменяемыми показателями. Разность прогнозов на разных целевых переменных нельзя трактовать как дополнительное качество.

Задача маршрутизации формулируется как оптимизационная модель. Решающей переменной служит политика $\pi \in \Pi$. Целевая функция, ожидаемое качество, определяется по формуле (1), средняя стоимость определяется по формуле (2).

$$Q(\pi) = E[(1 - \pi(x))\mu_0(x) + \pi(x)\mu_1(x)]. \quad (1)$$

$$C(\pi) = E[c_r(x) + (1 - \pi(x))c_0(x) + \pi(x)c_1(x)]. \quad (2)$$

Математическое ожидание в формулах (1) и (2) берётся по распределению запросов. Потоковая задача состоит в максимизации целевой функции (1) на множестве допустимых политик при бюджетном ограничении на стоимость (2) и записывается в виде формулы (3).

$$\pi* \in argmax(\pi \in \Pi)\, Q(\pi) \text{ при } C(\pi) \le B,\ 0 \le \pi(x) \le 1. \quad (3)$$

Задача (3) имеет решение, если $B \ge E[c_r(x) + c_0(x)]$, то есть если бюджета хватает хотя бы на обработку всех запросов рекомендателем. Если $B \ge E[c_r(x) + c_1(x)]$, ограничение неактивно. Денежные расходы и задержка измеряются отдельно, если способ их объединения не определён явно; состав затрат приведён в таблице 1 в подразделе «Последовательность применения».

В пакетном режиме решение принимается сразу для n запросов с признаками $x_1, \ldots, x_n$, и решающей переменной служит вектор $z \in \{0, 1\}^n$, зависящий от всего пакета. Пакетная задача записывается формулами (4) и (5).

$$Q_n(z) = (1/n)\,\Sigma_i\,[\mu_0(x_i) + z_i\,\Delta\mu(x_i)] \to \max \text{ по } z \in \{0, 1\}^n. \quad (4)$$

$$C_n(z) = (1/n)\,\Sigma_i\,[c_r(x_i) + c_0(x_i) + z_i\,\Delta c(x_i)] \le B. \quad (5)$$

Задача (4)–(5) является дискретной задачей о рюкзаке. Связь её решения с потоковой задачей (3) показана в следующем подразделе.

Правило маршрутизации

Введём прирост качества $\Delta\mu(x) = \mu_1(x) - \mu_0(x)$ и дополнительную стоимость $\Delta c(x) = c_1(x) - c_0(x)$. Для задачи (3) составим функцию Лагранжа $L(\pi, \lambda) = Q(\pi) - \lambda(C(\pi) - B)$, $\lambda \ge 0$. При фиксированном λ функция L линейна по $\pi(x)$ и максимизируется поточечно, что даёт пороговое правило (6).

$$a\lambda(x) = 1\{\Delta\mu(x) - \lambda\Delta c(x) > 0\}. \quad (6)$$

Условия оптимизации для задачи (3) таковы: $\lambda \ge 0$; $C(a\lambda) \le B$; $\lambda(C(a\lambda) - B) = 0$. Если они выполнены, правило (6) оптимально в П. При атоме распределения $\Delta\mu(x)/\Delta c(x)$ в точке λ точное расходование бюджета достигается рандомизацией: на границе $\Delta\mu(x) = \lambda\Delta c(x)$ принимается $\pi(x) \in [0, 1]$. Высокая успешность агента не является достаточным основанием для вызова: дешёвая модель может решать тот же запрос не хуже. Произвольное λ не обеспечивает исходный бюджет, поэтому λ калибруется на отдельных данных.

Для пакетной задачи (4)–(5) примем постоянные затраты $c_0(x) = c_0$, $c_1(x) = c_1 > c_0$, $c_r(x) = 0$ и $B \ge c_0$. Тогда ограничение (5) эквивалентно условию $\Sigma_i\, z_i \le q$, где квота определяется по формуле (7).

$$q = \min(n, \lfloor n(B - c_0)/(c_1 - c_0) \rfloor). \quad (7)$$

При аддитивном качестве (4) оптимально выбрать не более q запросов с наибольшими положительными приростами. Доказательство строится обменом: замена выбранного меньшего прироста на невыбранный больший повышает Q_n при той же стоимости. Отрицательные значения исключаются, поскольку полное расходование квоты не обязательно.

Это пакетное правило совпадает с пороговым правилом (6) при множителе, подобранном по пакету. Упорядочим приросты: $\Delta\mu_{(1)} \geq \Delta\mu_{(2)} \geq \ldots \geq \Delta\mu_{(n)}$, положим $\Delta\mu_{(n+1)} = 0$, обозначим m число положительных приростов и $k = \min(q, m)$. Множитель выбирается по формуле (8).

$$\lambda_n = \max(\Delta\mu_{(k+1)}, 0)/(c_1 - c_0). \quad (8)$$

При $\lambda = \lambda_n$ правило (6) отбирает ровно k запросов с наибольшими положительными приростами, если $\Delta\mu_{(k)} > \Delta\mu_{(k+1)}$; при равенстве значений на границе квоты используется произвольный порядок среди равных. Из-за округления в формуле (7) бюджет B может быть израсходован не полностью, поэтому условие $\lambda(C - B) = 0$ выполняется не для исходного B, а для эффективного бюджета $B_q = c_0 + q(c_1 - c_0)/n$, где $B - (c_1 - c_0)/n < B_q \leq B$. Пара $(\hat{z}, \lambda_n)$ удовлетворяет условиям оптимизации задачи (4)–(5) с бюджетом B_q, а оптимальность $\hat{z}$ при исходном B следует из приведённого выше обменного аргумента, поскольку ни одно допустимое решение не содержит более q агентных вызовов. Следовательно, пакетная политика имеет вид $z_i = a\lambda_n(x_i)$: от признаков x_i зависит сравниваемая величина $\Delta\mu(x_i)$, а от всего пакета зависит только порог λ_n. Если распределение $\Delta\mu(x)$ непрерывно и ограничение активно, λ_n как выборочный квантиль при $n \to \infty$ сходится по вероятности к множителю λ^* потоковой задачи (3), а доля агентных вызовов k/n стремится к $(B - c_0)/(c_1 - c_0)$. Пакетное правило (7)–(8) поэтому служит эмпирической реализацией калибровки λ для правила (6).

Пусть $|\Delta\hat{\mu}_i - \Delta\mu_i| \leq \varepsilon$ для каждого запроса, z* оптимально для задачи (4)–(5) при истинных приростах, а $\hat{z}$ точно оптимально при прогнозах. Обозначим $Q^* = Q_n(z^*)$, $\hat{Q} = Q_n(\hat{z})$, обе величины вычисляются по истинным μ_0, μ_1. Средняя потеря ограничена формулой (9).

$$Q^* - \hat{Q} \leq 2q\varepsilon/n. \quad (9)$$

Для получения формулы (9) к разности истинных сумм добавляются и вычитаются суммы прогнозов. Разность прогнозных сумм неположительна по оптимальности $\hat{z}$. Ошибка на каждом из двух множеств не превышает qε. Это стандартный аргумент оценки потерь, а не новая общая теорема. Граница ε в эксперименте не оценивалась.

При переменных затратах сортировка по приросту либо его отношению к стоимости в общем случае не решает дискретную задачу (4)–(5) точно. При взаимозависимых запросах, например при общем остатке товара, аддитивная постановка (4) требует пересмотра.

Последовательность применения

Сначала задаются общий критерий результата и признаки, доступные до решения. На обучающих данных строятся оценки $\hat{\mu}_0(x)$ и $\hat{\mu}_1(x)$. Их разность $\Delta\hat{\mu}(x)$ передаётся бюджетному планировщику, который в пакетном режиме вычисляет квоту по формуле (7) и множитель по

формуле (8), а в потоковом режиме применяет правило (6) с откалиброванным λ. После исполнения единый валидатор проверяет допустимость результата. Журнал сохраняет признаки, выбранную ветвь, версии компонентов, затраты и наблюдаемый исход.

Составляющие $c_0(x)$, $c_1(x)$ и $c_r(x)$ в формуле (2) рассчитываются по правилам, приведённым в таблице 1.

Таблица 1. Учёт затрат при сравнении исполнителей

Компонент	Содержание	Правило учёта
Признаки	История, метаданные, контекст	Общие операции учитываются для обеих ветвей
Исполнение	Ранжирование либо модель и инструменты	Учитывается полная выбранная ветвь
Проверка	Валидатор и повторные попытки	Не исключать неудачные исполнения
Задержка	Маршрутизация, очередь, исполнение	Измерять отдельно от условной стоимости

В прикладной системе агент возвращает идентификаторы объектов и структурированные параметры. Наличие объекта, права доступа и обязательные условия проверяются внешним кодом. Число вызовов инструментов и повторных попыток ограничивается заранее. Эффективность этих проверок в симуляции отдельно не измеряется.

Пакетный алгоритм использует весь набор признаков пакета, но не будущие исходы. Для немедленного онлайн-ответа нужен порог λ, откалиброванный на предыдущих пакетах, либо контроллер остаточного бюджета. Если извлечение признаков требует предварительного запуска рекомендателя, его стоимость входит в $c_r(x)$ и учитывается и в агентной ветви. Информация, доступная только после работы агента, не может считаться бесплатным входом маршрутизатора.

Вычислительный эксперимент

Использованы синтетические данные. Реальные рекомендательные модели и языковые агенты не запускались. Ветви представлены вероятностями успеха. Такая среда позволяет проверить распределение бюджета при известном ориентире, но не определить качество конкретной языковой модели.

Проведены десять независимых запусков с начальными состояниями генератора NumPy от 100 до 109. Каждый содержит 12 000 обучающих и 8 000 тестовых запросов. Признаки h, s, d, k независимы и равномерно распределены на [0, 1]. Они условно обозначают достаточность истории, семантическую сложность, изменение предпочтений и сложность ограничений.

Вероятности успеха задаются через логистическую функцию (10) по формулам (11) и (12). Коэффициенты выбраны искусственно для создания неоднородного прироста $\Delta\mu(x)$, а не оценены по пользовательским наблюдениям.

$$\sigma(t) = 1/(1 + \exp(-t)). \tag{10}$$

$$\mu_0(x) = \sigma(1.2 + 2h - 1.8s - 0.8d - 0.5k). \tag{11}$$

$$\mu_1(x) = \sigma(1.1 + 0.5h + 0.8s - 0.3d - 0.4k + 0.8sk). \quad (12)$$

Для каждого запроса независимо генерируются два исхода Бернулли с вероятностями (11) и (12). Обучение получает оба потенциальных результата. Для эксплуатационных логов это сильное допущение, поскольку обычно наблюдается исход только показанной рекомендации.

Для каждого исполнителя обучается LogisticRegression на признаках (h, s, d, k, hs, sk). Использованы C = 100, max_iter = 1000 и остальные настройки по умолчанию scikit-learn 1.6.1. В абляции исключаются hs и sk. Полный класс моделей содержит генератор, поэтому проверка благоприятна для обучаемой маршрутизации.

Приняты c_0 = 1 у.е., c_1 = 20 у.е., $c_г$ = 0. Это условные величины, не тарифы и не время исполнения. При этих значениях выполняются условия вывода формулы (7). Для бюджетов B = 3, 6 и 10 у.е. квоты по формуле (7) равны 842, 2105 и 3789 обращениям из 8000.

Сравниваются семь стратегий: только рекомендатель; только агент; случайный выбор; выбор наименьших h; прогнозируемый прирост полной модели; прирост без взаимодействий; оракул по истинному приросту. Обучаемые стратегии применяют правило (7)–(8) к прогнозам $\Delta\hat{\mu}(x)$, оракул применяет его к истинным приростам $\Delta\mu(x)$; обе стратегии исключают отрицательные значения прироста. Во всех выполненных запусках положительных значений достаточно для заполнения квот. При одном начальном состоянии случайный порядок одинаков для трёх бюджетов.

Основная метрика, ожидаемое качество $Q_п$ по формуле (4), равна среднему истинных вероятностей успеха выбранных исполнителей. Она доступна только в симуляции и не является измеренной конверсией. Тестовые вероятности и исходы не передаются обучаемой политике. По парным разностям десяти запусков рассчитаны 95 %-е интервалы Стьюдента с девятью степенями свободы. Поправки на множественные сравнения не применялись; анализ носит исследовательский характер.

Среда расчёта: NumPy 1.26.4, pandas 2.2.3, SciPy 1.13.1, scikit-learn 1.6.1. Perplexity использован для подготовки текста, формализации, подбора источников и кода. Расчёты выполнены в вычислительной среде помощника. Независимая проверка человеком не заявляется. Воспроизведение требует фиксации порядка генерации, начальных состояний, признаков и параметров обучения.

Результаты и обсуждение

Сравнение при одинаковом бюджете

В таблице 2 приведены среднее ожидаемое качество $Q_п$ по формуле (4) и выборочное стандартное отклонение по десяти запускам при B = 6 у.е. Стоимость рассчитана по формуле (5). Отклонение выражено в процентных пунктах и не является стандартной ошибкой среднего. Режим «только агент» превышает бюджет и служит ориентиром неограниченного расхода.

Таблица 2. Результаты при бюджете 6 условных единиц

Политика	Качество, %	Станд. откл., п.п.	Стоимость
Только рекомендатель	63,7287	0,2240	1,0000
Только агент	82,4899	0,0515	20,0000
Случайная	68,6758	0,1963	5,9994
История	72,1532	0,1605	5,9994
Обучаемая	75,4273	0,1348	5,9994
Без взаимодействий	75,4259	0,1351	5,9994
Оракул	75,4356	0,1337	5,9994

Обучаемая политика превосходит случайную в среднем на 6,7515 процентного пункта с парным 95 %-м интервалом [6,6789; 6,8242]. Выигрыш относительно эвристики истории равен 3,2741 пункта с интервалом [3,2131; 3,3352]. Обе нижние границы положительны. Эти величины характеризуют различия внутри заданной среды с вероятностями (11) и (12), а не пользовательский эффект внедрения.

Стоимость примерно на 70 % ниже, чем при обработке всех запросов агентом, но ожидаемое качество ниже на 7,06 процентного пункта. Экономия сопровождается потерей результата. Описывать её как сохранение агентного качества было бы неверно.

Бюджет и состав признаков

В таблице 3 показана зависимость результата от бюджета. Доля агентных исполнений равна q/n по формуле (7): 10,525 % при B = 3, около 26,313 % при B = 6 и около 47,363 % при B = 10 у.е. Небольшое недоиспользование ресурса связано с округлением в формуле (7).

Таблица 3. Ожидаемая успешность при разных бюджетах, %

Бюджет	Случайная	История	Обучаемая	Оракул
3	65,70	67,41	69,39	69,39
6	68,68	72,15	75,43	75,44
10	72,59	76,94	80,63	80,64

При B = 3 и B = 10 у.е. обучаемая политика также превосходит случайную (на 3,69 и 8,04 п.п.) и эвристику истории (на 1,98 и 3,69 п.п.), то есть знак разностей совпадает с результатом при B = 6 у.е. Условия подтверждения гипотезы H1 выполнены.

Исключение взаимодействий при B = 6 у.е. почти не меняет результат. Средний выигрыш полной модели равен 0,0014 процентного пункта с интервалом [−0,0004; 0,0032]. Интервал содержит нуль, поэтому гипотеза H2 не подтверждена. Более точные вероятности не обязательно меняют порядок запросов около границы квоты (7), то есть около порога λ_n в формуле (8).

Оракул превосходит обучаемую политику в среднем на 0,0082 процентного пункта. Это фактическая потеря $Q^* - \hat{Q}$ из формулы (9); поскольку ε не оценивалась, проверить по ней точность границы (9) нельзя. Малый разрыв связан в том числе с правильной спецификацией и доступностью двух обучающих исходов. Он не доказывает близость к оптимуму при шумных признаках, другом каталоге или изменении пользовательского поведения.

Сопоставление и ограничения

В отличие от FrugalGPT [1] здесь не проверяется последовательный каскад языковых вызовов. В отличие от RouteLLM [7] прогноз относится к общему критерию рекомендации, а не к предпочтению текстового ответа. Эти различия определяют постановку, но сами по себе не доказывают научную новизну или превосходство метода.

Перенос на эксплуатационные данные связан с частичной обратной связью. Контекстные бандиты применялись к персонализированным рекомендациям [6]. Doubly robust оценивание объединяет модель награды с информацией о политике сбора [2]. Для его использования нужны покрытие действий и корректные причинные предпосылки. Если агент не обрабатывал некоторый тип запросов, недостаток наблюдений нельзя устранить одной заменой оценивателя.

Прикладная проверка должна фиксировать модели, инструменты, каталог и критерий успеха. В расход (2) включаются извлечение признаков, повторные попытки и валидатор. Для потокового режима отдельно оцениваются задержка и перерасход. Множитель λ в правиле (6) настраивается на валидационных данных до обращения к тестовым исходам.

Пример ограничен искусственными признаками и вероятностями (11) и (12), полной наблюдаемостью исходов, постоянной стоимостью и нулевыми накладными расходами, при которых справедлива формула (7). Не моделируются отказы инструментов, очереди, приватность и долгосрочные последствия рекомендаций. Десять повторов характеризуют случайность выборок, но не неопределённость выбора генератора. Нужны проверки при изменении распределения и с реальными исполнителями.

Заключение

Задача выбора исполнителя сформулирована как оптимизационная модель: максимизация ожидаемого качества (1) на множестве политик Π при бюджетном ограничении на среднюю стоимость (2) в потоковом режиме (3) и в пакетном режиме (4)–(5). Из функции Лагранжа получено пороговое правило (6). Показано, что при постоянной дополнительной стоимости пакетный выбор наибольших положительных приростов в пределах квоты (7) совпадает с правилом (6) при множителе (8), и указана граница потерь (9) при ошибке прогноза.

Гипотеза H1 подтверждена в рассматриваемой синтетической среде: при $B = 6$ у.е. обучаемая политика превзошла случайный выбор на 6,75 п.п. и эвристику истории на 3,27 п.п. с положительными нижними границами 95 %-х интервалов, а при $B = 3$ и $B = 10$ у.е. знак разностей сохранился. Гипотеза H2 о пользе взаимодействий признаков не подтверждена. Рост бюджета повышает успешность, сохраняя компромисс между качеством и расходом. Подтверждение H1 не переносится автоматически на реальные модели и пользовательские данные.

Методика может использоваться как протокол проверки гибридной системы. Решение о внедрении требует реальных моделей, измерения полной стоимости и оценки при неполной обратной связи. Полученные проценты нельзя использовать как прогноз конверсии или экономии действующего сервиса.

Список литературы

1. Chen L., Zaharia M., Zou J. FrugalGPT: How to Use Large Language Models While Reducing Cost and Improving Performance. 2023. arXiv:2305.05176. DOI: 10.48550/arXiv.2305.05176.
2. Dudík M., Langford J., Li L. Doubly Robust Policy Evaluation and Learning. 2011. arXiv: 1103.4601. DOI: 10.48550/arXiv.1103.4601.
3. He X., Deng K., Wang X., Li Y., Zhang Y., Wang M. LightGCN: Simplifying and Powering Graph Convolution Network for Recommendation // Proceedings of SIGIR. – 2020. – P. 639–648. – DOI: 10.1145/3397271.3401063.
4. He X., Liao L., Zhang H., Nie L., Hu X., Chua T.-S. Neural Collaborative Filtering // Proceedings of WWW. – 2017. – P. 173–182. – DOI: 10.1145/3038912.3052569.
5. Kang W.-C., McAuley J. Self-Attentive Sequential Recommendation // Proceedings of ICDM. – 2018. – P. 197–206. – DOI: 10.1109/ICDM.2018.00035.
6. Li L., Chu W., Langford J., Schapire R.E. A contextual-bandit approach to personalized news article recommendation // Proceedings of WWW. – 2010. – P. 661–670. – DOI: 10.1145/1772690.1772758.
7. Ong I., Almahairi A., Wu V., Chiang W.-L., Wu T., Gonzalez J.E., Kadous M.W., Stoica I. RouteLLM: Learning to Route LLMs with Preference Data. 2024. Revised 2025. arXiv: 2406.18665. DOI: 10.48550/arXiv.2406.18665.
8. Peng Q., Liu H., Huang H., Yang J., Yang Q., Shao M. A Survey on LLM-powered Agents for Recommender Systems // Findings of the Association for Computational Linguistics: EMNLP. – 2025. – P. 11574–11583. – DOI: 10.18653/v1/2025.findings-emnlp.620.
9. Wu L., Zheng Z., Qiu Z. et al. A survey on large language models for recommendation // World Wide Web. – 2024. – T. 27. – DOI: 10.1007/s11280-024-01291-2.
10. Zhang Y., Qiao S., Zhang J., Lin T.-H., Gao C., Li Y. A Survey of Large Language Model Empowered Agents for Recommendation and Search: Towards Next-Generation Information Retrieval // ACM Transactions on Information Systems. – 2026. – DOI: 10.1145/3842663.

References

1. Chen L., Zaharia M., Zou J. FrugalGPT: How to Use Large Language Models While Reducing Cost and Improving Performance. 2023. arXiv:2305.05176. DOI: 10.48550/arXiv.2305.05176.
2. Dudík M., Langford J., Li L. Doubly Robust Policy Evaluation and Learning. 2011. arXiv: 1103.4601. DOI: 10.48550/arXiv.1103.4601.
3. He X., Deng K., Wang X., Li Y., Zhang Y., Wang M. LightGCN: Simplifying and Powering Graph Convolution Network for Recommendation // Proceedings of SIGIR. – 2020. – P. 639–648. – DOI: 10.1145/3397271.3401063.
4. He X., Liao L., Zhang H., Nie L., Hu X., Chua T.-S. Neural Collaborative Filtering // Proceedings of WWW. – 2017. – P. 173–182. – DOI: 10.1145/3038912.3052569.
5. Kang W.-C., McAuley J. Self-Attentive Sequential Recommendation // Proceedings of ICDM. – 2018. – P. 197–206. – DOI: 10.1109/ICDM.2018.00035.

6. Li L., Chu W., Langford J., Schapire R.E. A contextual-bandit approach to personalized news article recommendation // Proceedings of WWW. – 2010. – P. 661–670. – DOI: 10.1145/1772690.1772758.
7. Ong I., Almahairi A., Wu V., Chiang W.-L., Wu T., Gonzalez J.E., Kadous M.W., Stoica I. RouteLLM: Learning to Route LLMs with Preference Data. 2024. Revised 2025. arXiv: 2406.18665. DOI: 10.48550/arXiv.2406.18665.
8. Peng Q., Liu H., Huang H., Yang J., Yang Q., Shao M. A Survey on LLM-powered Agents for Recommender Systems // Findings of the Association for Computational Linguistics: EMNLP. – 2025. – P. 11574–11583. – DOI: 10.18653/v1/2025.findings-emnlp.620.
9. Wu L., Zheng Z., Qiu Z. et al. A survey on large language models for recommendation // World Wide Web. – 2024. – Vol. 27. – DOI: 10.1007/s11280-024-01291-2.
10. Zhang Y., Qiao S., Zhang J., Lin T.-H., Gao C., Li Y. A Survey of Large Language Model Empowered Agents for Recommendation and Search: Towards Next-Generation Information Retrieval // ACM Transactions on Information Systems. – 2026. – DOI: 10.1145/3842663.

ЭЛЕКТРОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И РАДИОТЕХНИКА

Статья поступила в редакцию: 11.09.2026
Статья принята к публикации: 16.11.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 621.396.77+004.738.5

DOI: 10.32743/UniTech.2026.151.10.23623

Оптимизация радиоресурсов с учетом помех для устройств интернета вещей в гетерогенных сетях 5G

Ахунов Ашраф Абдухафиз угли
д-р филос. по техн. наукам (PhD) начальник цикла кафедры, Институт информационно-коммуникационных технологий и военной связи Университет военной безопасности и обороны
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: ashrafag290994@gmail.com

Исломов Равшан Туйчиевич
магистрант
Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммада аль-Хорезми
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: ravshanislomov26@gmail.com

Interference-aware radio resource optimization for internet of things devices in 5G heterogeneous networks

Akhunov Ashraf
PhD in Technical Sciences Head of the Cycle of the Department Institute of Information and Communication Technologies and Military Communications University of Military Security and Defense
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Islomov Ravshan
Master's student, Tashkent University of Information echnologies named after Muhammad al-Khwarizmi
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

В статье исследуется задача оптимального сопоставления устройств Интернета вещей (IoT) с базовыми станциями и эффективного распределения радиоресурсов в гетерогенных сетях пятого поколения (5G). Рассматривается двухуровневая архитектура сети, включающая

Библиографическое описание: Ахунов А.А.У., Исломов Р.Т. Оптимизация радиоресурсов с учетом помех для устройств интернета вещей в гетерогенных сетях 5G // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23623

макробазовые и маломощные базовые станции. Для балансировки нагрузки между уровнями сети применяется механизм расширения зоны покрытия (Cell Range Expansion – CRE), основанный на введении смещения при выборе базовой станции. В отличие от известных моделей CRE, в которых помехи оцениваются в предположении полной загрузки сети, в предложенной модели помехи на каждом ресурсном блоке учитываются через индикатор его фактической занятости соседними станциями, благодаря чему влияние смещения CRE на помехи описывается в явном виде. Задача совместного выбора смещения, подключения устройств и распределения ресурсных блоков представлена в виде нелинейной смешанно-целочисленной модели с целевой функцией максимизации суммарной скорости передачи данных. Численные расчёты при различных значениях смещения CRE показали, что суммарная скорость достигает максимума 546,8 Мбит/с при смещении 9 дБ, что на 59,6 % выше, чем без CRE, а при дальнейшем увеличении смещения снижается из-за роста помех.

Abstract

The article investigates the problem of optimal association of Internet of Things (IoT) devices with base stations and efficient radio resource allocation in fifth-generation (5G) heterogeneous networks. A two-tier network architecture consisting of macro and low-power base stations is considered. To balance the load between the tiers, the Cell Range Expansion (CRE) mechanism is applied by introducing a bias in the base station selection. Unlike known CRE models, in which interference is evaluated under the full-load assumption, the proposed model accounts for the interference on each resource block through an indicator of its actual occupancy by neighbouring stations, so that the effect of the CRE bias on interference is described explicitly. The joint problem of bias selection, device association and resource block allocation is formulated as a nonlinear mixed-integer model maximizing the total data rate. Numerical calculations for different CRE bias values show that the total rate reaches its maximum of 546.8 Mbit/s at a 9 dB bias, which is 59.6 % higher than without CRE, and decreases with a further increase of the bias due to growing interference.

Ключевые слова: гетерогенные сети пятого поколения, Интернет вещей, расширение зоны покрытия, ресурсные блоки, помехи, математическая оптимизация.

Keywords: fifth-generation heterogeneous networks, Internet of Things, cell range expansion, resource blocks, interference, mathematical optimization.

Введение

В современных системах беспроводной связи обеспечение эффективного и рационального использования сетевых ресурсов каждым подключенным устройством является одной из актуальных научно-технических задач. В частности, стремительный рост трафика данных и внедрение различных видов услуг требуют новых подходов к эффективному распределению существующих частотных ресурсов.

Для повышения ёмкости сетей 5G применяются гетерогенные сети, в которых макробазовые станции дополняются маломощными малыми станциями [6, 7, 14, 4]. Поскольку при подключении по максимуму принимаемой мощности большинство устройств остаётся на макроуровне, для балансировки нагрузки используется механизм расширения

зоны покрытия (CRE), при котором к мощности сигнала малой станции добавляется смещение [12, 11]. Величину смещения подбирают с помощью метаэвристик [5], правил балансировки нагрузки [9, 15] или совместно с распределением частотных ресурсов [13]. В [16] смещение CRE выбирается совместно с долей почти пустых субкадров (ABS) механизма eICIC, т.е. защита устройств зоны расширения обеспечивается во временной области единым для сети параметром. В работе Jiang et al. [10] решается задача распределения мощности и ресурсных блоков по критерию энергоэффективности с учётом CRE и межуровневой координации помех, при этом смещение CRE входит в постановку как параметр сценария. В аналитических моделях [7, 8, 11] помехи оцениваются в предположении полной загрузки, когда все мешающие станции считаются активными на всех ресурсных блоках. Таким образом, в известных моделях мощность помех не зависит от фактической занятости ресурсных блоков соседними станциями, и изменение смещения CRE не отражается на помеховой обстановке на конкретном ресурсном блоке.

В данной статье рассматривается задача совместной оптимизации смещения CRE, подключения IoT-устройств и распределения ресурсных блоков в двухуровневой сети. **Научная новизна** работы состоит в следующем: 1) за основу принята известная модель помех полной загрузки (29) [7, 11], в которую введён индикатор занятости ресурсного блока $\alpha_{j',r}$; полученное выражение (12) учитывает помехи отдельно на каждом ресурсном блоке, а известная модель является его частным случаем; 2) смещение CRE включено в число переменных оптимизации (15) и связано с занятостью ресурсных блоков через ограничения (18), (20), (21), поэтому влияние смещения на помехи описывается в явном виде; 3) для IoT-устройств введены ограничения минимальной скорости (22) и допустимых помех на каждом ресурсном блоке (24); 4) в итерационном алгоритме (рис. 4) при каждом значении смещения распределение ресурсных блоков и помехи пересчитываются до установления занятости ресурсных блоков. Сопоставление с известными моделями по схеме «существующая модель – ограничение – изменение – эффект» приведено в табл. 1.

Материалы и методы

Модель системы и её математические основы

Рассматриваемая гетерогенная сеть пятого поколения представляет собой двухслойную архитектуру, состоящую из макробазовых станций и маломощных малых базовых станций и использующую радиодоступ NR [2]. Макробазовые станции обеспечивают широкое территориальное покрытие, в то время как малые базовые станции предоставляют дополнительные радиоресурсы в зонах с высокой плотностью трафика. В данной сетевой архитектуре одной из ключевых задач является эффективное использование радиоресурсов и сбалансированное распределение нагрузки между базовыми станциями.

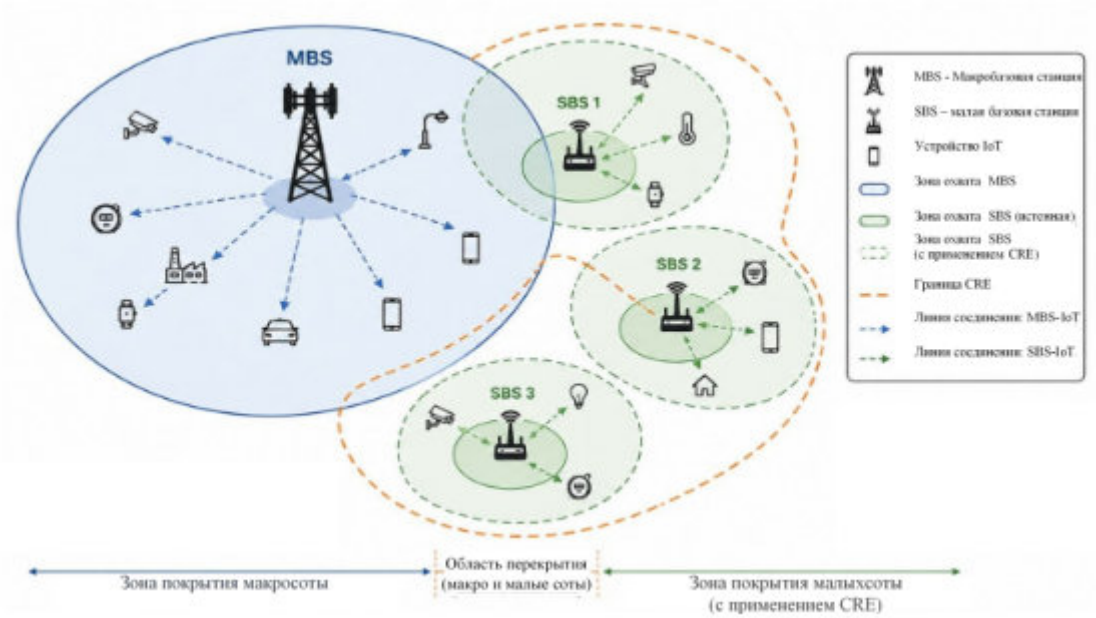


Рисунок 1. Модель ассоциации IoT-устройств на основе двухслойной архитектуры системы 5G HetNet и CRE

Для полного описания механизма функционирования сети и формирования её математической модели сначала вводятся основные множества, описывающие геометрические и функциональные элементы сети.

Сетевая модель и базовые наборы. Набор базовых станций определяется следующим образом:

$$B = B_M \cup B_S \tag{1}$$

где B_M - множество макробазовых станций, B_S - множество маломощных базовых станций.

Набор устройств Интернета вещей в сети обозначается как:

$$U = \{1, 2, \dots, N_U\} \tag{2}$$

где N_U – общее количество устройств в сети. Имеющиеся в сети радиоресурсы разделены на N_{RB} ресурсных блоков.

Набор ресурсных блоков выражается в виде:

$$R = \{1, 2, \dots, N_{RB}\} \tag{3}$$

Эффективная полоса частот каждого ресурсного блока обозначается как W [1]. Мощность передачи j-й базовой станции обозначается как P_j, а коэффициент усиления канала между устройством i и j-й базовой станцией – как G_{ij}. Коэффициент усиления канала учитывает затухание, зависящее от расстояния, теневое и мелкомасштабное затухание [3].

Мощность принимаемого сигнала и расширение зоны покрытия.

Мощность полезного сигнала, принимаемого i-м устройством от j-й базовой станции, определяется по следующей формуле:

$$P_{ij}^{rx} = P_j \, G_{ij} \tag{4}$$

Здесь P_j – мощность передатчика станции, G_{ij} – коэффициент усиления канала. Для направления дополнительных устройств на уровень малых базовых станций применяется механизм расширения зоны покрытия (CRE). Смещение CRE Δ_j (дБ) для j-й базовой станции определяется следующим образом:

$$\Delta_j = \begin{cases} 0, & j \in B_M \\ \geq 0, & j \in B_S \end{cases} \quad (5)$$

Метрика скорректированного сигнала, используемая при подключении устройства к базовой станции, определяется по шкале в децибелах следующим образом:

$$\gamma_{i,j} = 10 \log_{10} (P_{ij}^{rx}) + \Delta_j \quad (6)$$

В этом выражении P_{ij}^{rx} подставляется в милливаттах, то есть первое слагаемое выражено в дБм, а Δ_j – дополнительное смещение в пользу малой базовой станции. Увеличение смещения повышает вероятность выбора малой базовой станции. Для описания подключения устройства к базовой станции вводится бинарная переменная:

$$a_{ij} \in \{0, 1\} \quad (7)$$

Если $a_{ij} = 1$, то i–е устройство подключено к j-й базовой станции; если $a_{ij} = 0$, подключение отсутствует.

Распределение ресурсных блоков. Каждая базовая станция распределяет доступные ресурсные блоки между подключёнными к ней устройствами. Выделение ***r***-го ресурсного блока j-й базовой станцией i-му устройству описывается двоичной переменной:

$$x_{ij}^r \in \{0, 1\} \quad (8)$$

Если $x_{ij}^r = 1$, то r-й ресурсный блок выделен i-му устройству j-й базовой станцией. Состояние занятости ***r***-го ресурсного блока j-й базовой станции определяется следующим образом:

$$\alpha_{j,r} = \sum_{i \in U} x_{ij}^r, \quad \forall j \in B,\ r \in R \quad (9)$$

Поскольку каждый ресурсный блок в пределах одной базовой станции выделяется не более чем одному устройству, соблюдается следующее ограничение:

$$\sum_{i \in U} x_{ij}^r \leq 1,\ \forall j \in B,\ r \in R. \quad (10)$$

Поэтому:

$$\alpha_{j,r} \in \{0, 1\} \quad (11)$$

Модель помех на уровне ресурсного блока. Соканальные (внутриканальные) помехи возникают между базовыми станциями, одновременно использующими одни и те же ресурсные блоки. В предлагаемой модели помехи учитываются не как усреднённая по сети величина и не в предположении полной загрузки, а отдельно для каждого ресурсного блока с учётом его фактической занятости.

Если *i*-е устройство обслуживается *j*-й базовой станцией через *r*-й ресурсный блок, то мощность помех, создаваемых другими базовыми станциями $j' \neq j$, использующими тот же ресурсный блок, определяется как:

$$I_{ij}^{r} = \sum_{\substack{j' \in B \\ j' \neq j}} P_{ij'}^{rx} \, \alpha_{j',r} \tag{12}$$

Здесь $P_{ij'}^{rx} = P_{j'} G_{ij'}$ – мощность сигнала, принимаемого *i*-м устройством от мешающей j'-й базовой станции, $\alpha_{j',r}$ – индикатор занятости *r*-го ресурсного блока j'-й базовой станцией. Выражение (12) является ключевым элементом модели: незанятые РБ соседних станций ($\alpha_{j',r} = 0$) помех не создают, а изменение смещения CRE, меняя подключение устройств и занятость РБ, изменяет и помехи на каждом РБ.

Отношение сигнал/(помеха + шум) и скорость передачи данных. Отношение сигнал/(помеха + шум) (SINR) при связи *i*-го устройства с *j*-й базовой станцией через *r*-й ресурсный блок определяется следующим образом:

$$SINR_{ij}^{r} = \frac{P_{ij}^{rx}}{I_{ij}^{r} + N_0 W} \tag{13}$$

Здесь N_0 - спектральная плотность шума, а W - полоса частот одного ресурсного блока. Скорость передачи данных, достигаемая в каждом ресурсном блоке, определяется по следующей формуле, основанной на упрощённой модели предела Шеннона:

$$C_{ij}^{r} = W \log_2 (1 + SINR_{i,j}^{r}) \tag{14}$$

Таким образом, основная взаимосвязь в системе выражается в следующей последовательности:

$$\Delta_j \rightarrow \gamma_{ij} \rightarrow a_{ij} \rightarrow x_{ij}^{r} \rightarrow \alpha_{j,r} \rightarrow I_{ij}^{r} \rightarrow SINR_{ij}^{r} \rightarrow C_{ij}^{r}$$

Из этого следует, что смещение CRE влияет на итоговую скорость передачи данных не напрямую, а через подключение устройств, распределение ресурсных блоков и вызванное ими изменение помех.

Постановка задачи оптимизации

На основе вышеописанной модели системы ставится задача совместной оптимизации решений по смещению зоны покрытия, подключению устройств к базовым станциям и распределению ресурсных блоков с учётом условий помех.

Δ_j – смещение CRE для *j* -й малой базовой станции;

$a_{ij} \in \{0,1\}$ – подключение *i*-го устройства к *j*-й базовой станции;

$x_{ij}^{r} \in \{0,1\}$ – выделение *r*-го ресурсного блока *i*-му устройству *j*-й базовой станцией;

$\alpha_{j,r} \in \{0,1\}$ – занятость *r*-го ресурсного блока *j*-й базовой станцией.

Вектор общих решений обозначается следующим образом:

$$X = \{\Delta, a, x, \alpha\} \tag{15}$$

Целевая функция. Основная цель исследования заключается в максимизации общей скорости передачи данных для всех устройств «Интернета вещей» в сети. Соответственно, целевая функция записывается следующим образом:

$$\max C_{total} = \sum_{i \in U} \sum_{j \in B} \sum_{r \in R} C_{ij}^{r} x_{ij}^{r} \tag{16}$$

Здесь C_{total} – суммарная скорость передачи данных сети. Множитель a_{ij} в (16) не требуется, поскольку согласно ограничению (20) ресурсные блоки выделяются только устройствам, подключённым к соответствующей базовой станции.

Ограничения на подключение устройств. Каждое устройство интернета вещей в сети подключается только к одной обслуживающей базовой станции:

$$\sum_{j \in B} a_{ij} = 1, \quad \forall i \in U \tag{17}$$

Решение о подключении основывается на скорректированной метрике сигнала (6), учитывающей смещение CRE:

$$a_{ij} = 1 \Rightarrow \gamma_{ij} \geq \gamma_{ij'}, \quad \forall i \in U,\ j, j' \in B,\ j' \neq j \tag{18}$$

Данное ограничение обеспечивает подключение устройства к базовой станции с наилучшей скорректированной метрикой сигнала.

Ограничения на распределение ресурсных блоков. В пределах каждой базовой станции один ресурсный блок в один и тот же момент времени выделяется не более чем одному устройству:

$$\sum_{i \in U} x_{ij}^{r} \leq 1, \quad \forall j \in B,\ r \in R \tag{19}$$

Ресурсный блок может быть выделен только устройству, подключенному к данной базовой станции:

$$x_{ij}^{r} \leq a_{ij,}\ \forall i \in U,\ j \in B,\ r \in R \tag{20}$$

Занятость *r*-го ресурсного блока *j*-й базовой станцией определяется выделенными этому блоку устройствами:

$$\alpha_{j,r} = \sum_{i \in U} x_{ij}^{r},\ \forall j \in B,\ r \in R \tag{21}$$

Ограничение качества обслуживания. Для каждого IoT-устройства требуется гарантировать минимальную скорость передачи данных $C_{\min}$:

$$\sum_{j\in B}\sum_{r\in R} C_{ij}^{r}\, x_{ij}^{r} \geq C_{\min}, \quad \forall i \in U \tag{22}$$

Это ограничение предотвращает ситуацию, когда некоторые устройства полностью лишаются ресурсов в процессе максимизации общей скорости сети.

Ограничение помех на уровне ресурсного блока. Помехи на каждом ресурсном блоке определяются выражением (12):

$$I_{ij}^{r} = \sum_{\substack{j'\in B \\ j'\neq j}} P_{ij'}^{rx}\, \alpha_{j',r} \tag{23}$$

Для всех используемых связей ($x_{ij}^{r} = 1$) помехи на ресурсном блоке не должны превышать допустимого значения $I_{\max}$:

$$I_{ij}^{r}\, x_{ij}^{r} \leq I_{\max}, \quad \forall i \in U,\ j \in B,\ r \in R \tag{24}$$

Данное ограничение вводится для того, чтобы не допустить чрезмерного увеличения помех при направлении дополнительных устройств на малые базовые станции за счёт расширения зоны охвата.

Ограничения на смещение CRE. Для макробазовых станций смещение не применяется:

$$\Delta_j = 0, \forall j \in B_M \tag{25}$$

Для малых базовых станций смещение выбирается в диапазоне от нуля до заданного максимального значения:

$$0 \leq \Delta_j \leq \Delta_{\max} \forall j \in B_S \tag{26}$$

Для двоичных переменных:

$$a_{ij},\ x_{ij}^{r},\ \alpha_{j,r} \in \{0,1\} \tag{27}$$

Модель совместной оптимизации. В результате объединения вышеуказанной целевой функции и ограничений возникает следующая общая задача оптимизации:

$$\max_{\Delta,a,x,\alpha} \sum_{i\in U}\sum_{j\in B}\sum_{r\in R} W \log_2\left(1 + \frac{P_{ij}^{rx}}{\sum_{\substack{j'\in B \\ j'\neq j}} P_{ij'}^{rx}\, \alpha_{j',r} + N_0 W}\right) x_{ij}^{r} \tag{28}$$

при ограничениях (17)–(27). Здесь $P_{ij}^{rx} = P_j G_{ij}$, а знаменатель под знаком логарифма включает помехи (12) и тепловой шум.

В данной модели смещение CRE влияет на подключение устройств, подключение – на распределение ресурсных блоков, а занятость ресурсных блоков – на мощность помех, которая, в свою очередь, определяет SINR и скорость передачи данных. Отметим, что при заданном векторе смещений подключение a_{ij} однозначно определяется правилом (18), поэтому независимыми переменными фактически являются Δ_j и x_{ij}^r. Наличие бинарных переменных и нелинейной (логарифмической) зависимости скорости от $\alpha_{j',r}$ относит задачу (28) к классу нелинейных смешанно-целочисленных задач оптимизации (MINLP).

Научная новизна: отличие предложенной модели от известных

За основу принята стандартная модель нисходящего канала гетерогенной сети с подключением по максимуму смещённой мощности сигнала [12, 11] и моделью помех при полной загрузке [7, 11]. В известной модели помехи и SINR для i-го устройства, обслуживаемого *j*-й станцией, записываются в виде:

$$I_{ij}^{FL} = \sum_{\substack{j' \in B \\ j' \neq j}} P_{ij'}^{rx} \tag{29}$$

$$SINR_{ij}^{FL} = \frac{P_{ij}^{rx}}{I_{ij}^{FL} + N_0 W} \tag{30}$$

Ограничение известной модели. Величины (29), (30) не зависят ни от номера ресурсного блока *r*, ни от решений о распределении ресурсов, и $\partial I_{ij}^{FL}/\partial \Delta_j = 0$: смещение CRE меняет только обслуживающую станцию устройства, но не помеховую обстановку. Поэтому в такой модели нельзя учесть, что разгрузка макроуровня освобождает часть ресурсных блоков, а дополнительная загрузка малых станций занимает новые ресурсные блоки и увеличивает помехи соседним устройствам.

Изменение, внесённое автором. Каждое слагаемое выражения (29) умножено на индикатор занятости $\alpha_{j',r}$, определяемый решениями о распределении ресурсных блоков (21). В результате получено выражение (12), в котором помехи зависят от номера ресурсного блока и от вектора решений: $I_{ij}^r = I_{ij}^r(\alpha(x(a(\Delta))))$. При $\alpha_{j',r} = 1$ для всех j', r выражение (12) совпадает с (29), т.е. известная модель является частным случаем предложенной. Совместно с ограничением (24) модель вынуждает освобождать ($\alpha_{j',r} = 0$) те ресурсные блоки соседних станций, которые создают недопустимые помехи, т.е. защита устройств зоны расширения осуществляется в частотной области на уровне отдельных ресурсных блоков, а не гашением целых субкадров, как в eICIC [16].

Полученный эффект. Смещение CRE становится переменной, влияние которой на помехи описывается в явном виде, а его оптимальное значение определяется с учётом фактической занятости ресурсных блоков. Именно это обусловливает наличие максимума суммарной скорости по смещению (рис. 2).

Таблица 1. Сопоставление предложенной модели с известными моделями

Существующая модель	Ограничение	Изменение, внесённое автором	Полученный эффект
Помехи при полной загрузке (29), (30) [7, 9]	Помехи не зависят от ресурсного блока и решений планировщика; смещение CRE не влияет на помехи	Помехи на каждом ресурсном блоке учитываются через индикатор $\alpha_{j',r}$, выражение (12); (29) – частный случай при $\alpha \equiv 1$	Незанятые ресурсные блоки не создают помех; влияние CRE на помехи учтено явно
CRE с общим смещением, подбираемым перебором или обучением [6, 9]	Смещение – внешний параметр, не связанный с распределением ресурсных блоков	Δ_j включено в вектор решений (15) с ограничениями (25), (26) и связано с a, x, α через (18), (20), (21)	Смещение выбирается совместно с распределением ресурсных блоков и помехами
Совместный выбор смещения CRE и доли ABS (eICIC) [2]	Защита во временной области единым для сети параметром	Ограничение помех (24) на каждом ресурсном блоке	Освобождаются только мешающие ресурсные блоки, а не целые субкадры
Распределение мощности и ресурсных блоков с CRE по критерию энергоэффективности [1]	Смещение – параметр сценария; требования IoT-устройств не выделены	Критерий – суммарная скорость (16) при минимальной скорости каждого устройства (22); смещение – переменная	Требования IoT-устройств учитываются при выборе смещения

Метод решения модели и численные расчёты

Для оценки эффективности разработанной математической модели численные расчёты были выполнены в среде программирования Python. Была создана двухслойная гетерогенная сетевая среда из 3 макробазовых станций, 12 малых базовых станций, 100 устройств IoT и 50 ресурсных блоков. Смещение CRE задавалось одинаковым для всех малых станций (частный случай ограничения (26)) и изменялось от 0 до 15 дБ; результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2. Влияние смещения CRE на показатели сети

Смещение CRE, дБ	Доля устройств на малых базовых станциях, %	Средний SINR, дБ	Общая скорость передачи данных, Мбит/с
0	32,5	14,8	342,6
3	45,2	13,2	415,4
6	58,4	11,5	488,2
9	71,1	9,8	546,8
12	79,5	7,4	512,3
15	86,2	5,1	465,0

Результаты показывают, что увеличение смещения CRE приводит к росту доли устройств, подключённых к малым базовым станциям, с 32,5 % при 0 дБ до 86,2 % при 15 дБ. Одновременно растут соканальные помехи, и среднее значение SINR снижается с 14,8 дБ до 5,1 дБ.

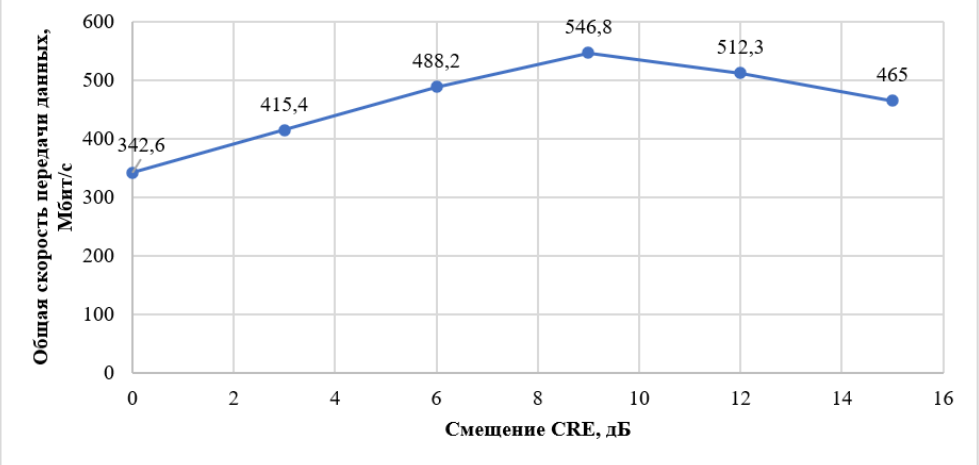


Рисунок 2. Влияние смещения CRE на суммарную скорость передачи данных

Суммарная скорость передачи данных сначала возрастает за счёт балансировки нагрузки и достигает максимума 546,8 Мбит/с при смещении 9 дБ, что на 59,6 % больше, чем без CRE (342,6 Мбит/с). При смещении более 9 дБ преобладает влияние помех, и при 15 дБ скорость снижается до 465,0 Мбит/с, т.е. на 15,0 % относительно максимума.

Результаты и обсуждение

Моделирование показало, что механизм CRE повышает эффективность использования радиоресурсов, однако эта эффективность определяется не только числом устройств, переведённых на малые станции. При увеличении смещения доля устройств на малых станциях возросла с 32,5 % до 86,2 %, тогда как средний SINR снизился с 14,8 дБ до 5,1 дБ. В этом и состоит основное противоречие механизма: разгрузка макроуровня улучшает использование ресурсов, но устройства зоны расширения становятся более подвержены помехам.

Максимальное значение суммарной скорости при 9 дБ указывает именно на этот баланс: в диапазоне 0–9 дБ выигрыш от распределения нагрузки преобладает над негативным воздействием помех, а выше 9 дБ преобладают помехи. Наличие этого максимума обусловлено введённой в (12) зависимостью помех от занятости ресурсных блоков: в модели полной загрузки (29) смещение не изменяет помехи. Поэтому смещение CRE целесообразно определять индивидуально для каждой малой базовой станции с учётом помеховой обстановки на её ресурсных блоках, а не устанавливать единым постоянным значением.

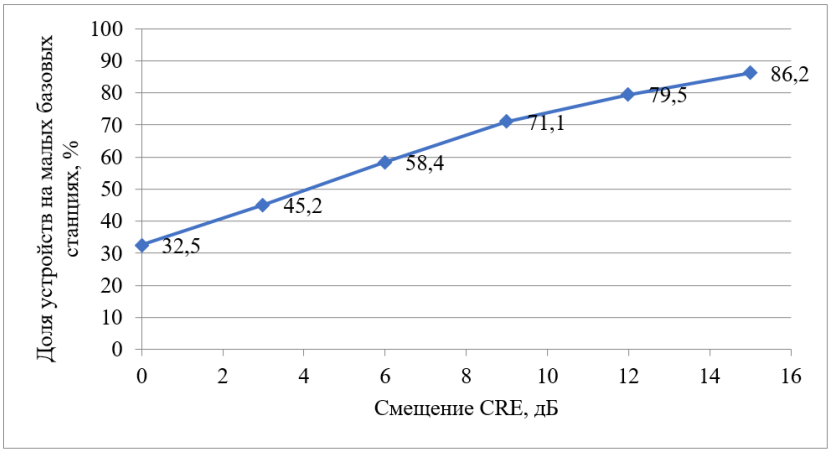


Рисунок 3. Влияние смещения CRE на долю устройств в слое малых базовых станций

Вычислительная сложность модели

В построенной модели бинарный характер переменных a_{ij}, x_{ij}^{r}, $\alpha_{j,r}$ и логарифмическая функция скорости относят задачу к классу нелинейной смешанно-целочисленной оптимизации.

Число бинарных переменных $N_U|B|(N_{RB}+1)+|B|N_{RB}$ растёт линейно с числом устройств и ресурсных блоков, а пространство допустимых решений – экспоненциально (для рассмотренной сети – 77 250 бинарных переменных). Поэтому в крупных сетях вместо точных методов применяется итерационный подход (рис. 4): для каждого значения смещения выполняются подключение устройств, распределение ресурсных блоков и расчёт помех, SINR и скорости, после чего при отсутствии сходимости распределение обновляется и расчёт повторяется.

Новизна алгоритма по сравнению с перебором общего смещения [11] состоит в том, что при каждом значении смещения распределение ресурсных блоков и помехи (12) пересчитываются совместно до установления занятости ресурсных блоков $\alpha_{j,r}$; таким образом, каждое значение смещения оценивается при фактической, а не полной загрузке сети. Сложность одной итерации составляет $O(N_U|B|N_{RB})$, т.е. полиномиально зависит от размерности сети.

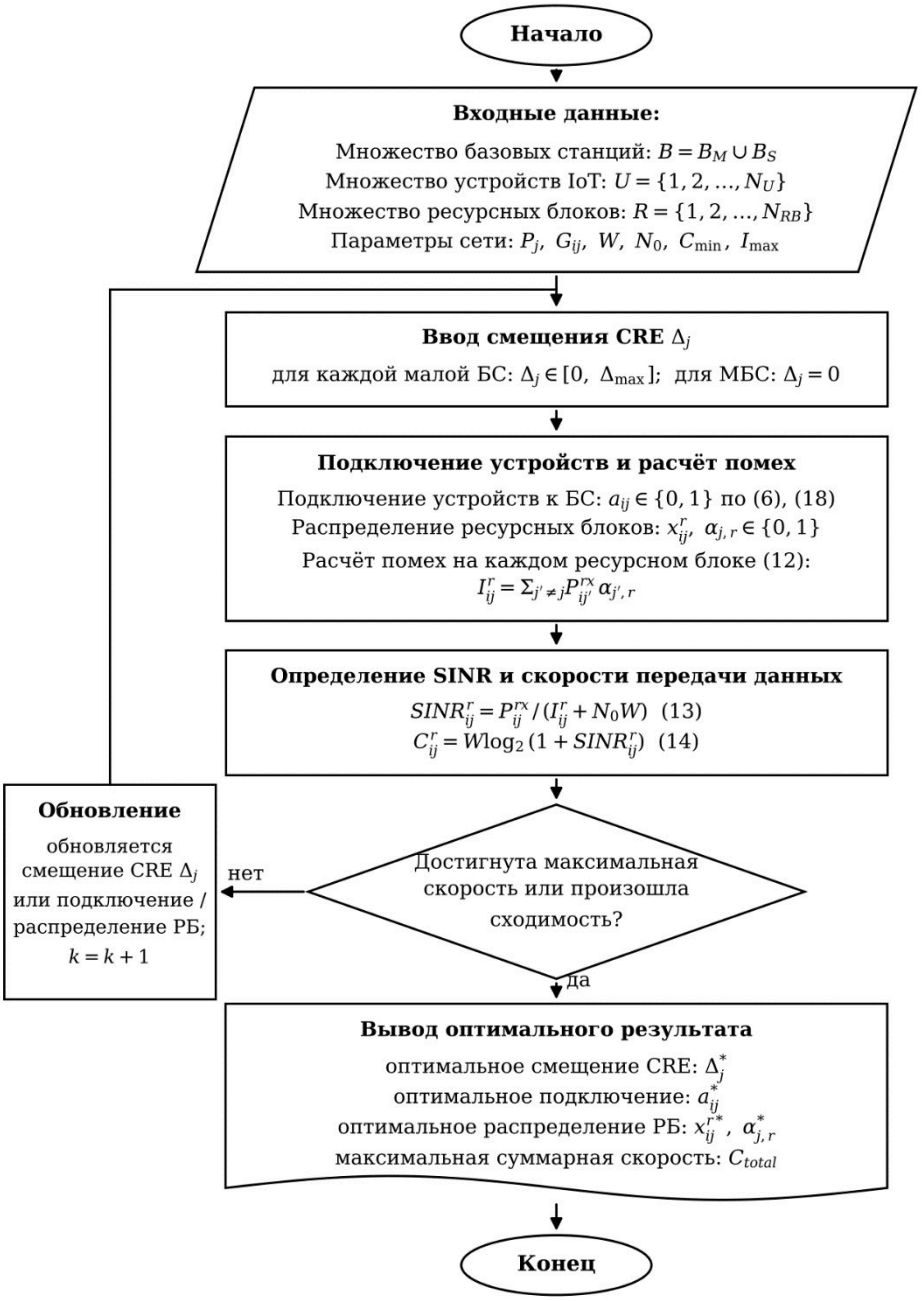


Рисунок 4. Блок-схема итерационного алгоритма для совместной оптимизации подключения устройств IoT и распределения ресурсов

Заключение

В настоящем исследовании рассмотрена задача подключения устройств IoT к базовым станциям в гетерогенных сетях 5G и оптимизации радиоресурсов с учётом помех. В отличие от известных моделей CRE, использующих допущение полной загрузки, в предложенной модели помехи на каждом ресурсном блоке учитываются через индикатор его фактической занятости (12), а известная модель (29) является её частным случаем; смещение CRE включено в число переменных оптимизации и связано с подключением устройств и занятостью ресурсных блоков.

В результате численных расчётов установлено, что при смещении 9 дБ суммарная скорость передачи данных достигает максимума 546,8 Мбит/с, что на 59,6 % выше, чем без CRE. Превышение этого значения, хотя и увеличивает долю устройств на малых станциях, снижает суммарную пропускную способность сети из-за роста соканальных помех.

Следовательно, смещение CRE и распределение радиоресурсов необходимо оптимизировать совместно с учётом занятости ресурсных блоков. В дальнейшем модель можно расширить выбором индивидуальных смещений, показателями энергоэффективности и условиями динамического трафика.

Список литературы

1. 3GPP TS 38.211. NR; Physical channels and modulation. Release 19. Version 19.4.0. – 3GPP. – 3GPP. – 2026. – 178 P.
2. 3GPP TS 38.300. NR; NR and NG-RAN overall description; Stage-2. Release 19. Version 19.3.0. – 3GPP. – 3GPP. – 2026.
3. 3GPP TR 38.901. Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz. Release 18. – 3GPP. – 3GPP. – 2024.
4. Alam M.J., Hossain M.R., Azad S., Chugh R. An overview of LTE/LTE-A heterogeneous networks for 5G and beyond // Transactions on Emerging Telecommunications Technologies. – 2023. – T. 34, № 8. – DOI: 10.1002/ett.4806.
5. Alam M.J., Chugh R., Azad S., Hossain M.R. Ant colony optimization-based solution to optimize load balancing and throughput for 5G and beyond heterogeneous networks // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. – 2024. – DOI: 10.1186/s13638-024-02376-2.
6. Andrews J.G., Buzzi S., Choi W., Hanly S.V., Lozano A., Soong A.C.K., Zhang J.C. What will 5G be? // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2014. – T. 32, № 6. – P. 1065–1082.
7. Dhillon H.S., Ganti R.K., Baccelli F., Andrews J.G. Modeling and analysis of K-tier downlink heterogeneous cellular networks // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2012. – T. 30, № 3. – P. 550–560.
8. ElSawy H., Sultan-Salem A., Alouini M.-S., Win M.Z. Modeling and analysis of cellular networks using stochastic geometry: a tutorial // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2017. – T. 19, № 1. – P. 167–203.
9. Gures E., Shayea I., Saad S.A., Ergen M., El-Saleh A.A., Sid Ahmed N.M.O., Alnakhli M. Load balancing in 5G heterogeneous networks based on automatic weight function // ICT Express. – 2023. – T. 9, № 6. – P. 1019–1025. – DOI: 10.1016/j.icte.2023.03.008.
10. Jiang J., Peng M., Li L., Wang W. Energy-efficient resource allocation in heterogeneous networks with cell range expansion // IET Networks. – 2015. – T. 4, № 4. – P. 209–219. – DOI: 10.1049/iet-net.2014.0003.
11. Jo H.-S., Sang Y.J., Xia P., Andrews J.G. Heterogeneous cellular networks with flexible cell association: a comprehensive downlink SINR analysis // IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2012. – T. 11, № 10. – P. 3484–3495.

12. Kudo T., Ohtsuki T. Cell range expansion using distributed Q-learning in heterogeneous networks // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. – 2013. – DOI: 10.1186/1687-1499-2013-61.
13. Lee H., Park J., Lee S.H., Lee I., Quek T.Q.S. Message-passing based user association and bandwidth allocation in HetNets with wireless backhaul // IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2023. – T. 22, № 1. – P. 704–717. – DOI: 10.1109/TWC.2022.3197843.
14. Xu Y., Gui G., Gacanin H., Adachi F. A survey on resource allocation for 5G heterogeneous networks: current research, future trends, and challenges // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2021. – T. 23. – P. 668–695.
15. Yoo H., Moon J., Na J., Hong E. User association and load balancing based on Monte Carlo tree search // IEEE Access. – 2023. – T. 11. – P. 126087–126097.
16. Zhang Q., Yang T., Zhang Y., Feng Z. Fairness guaranteed joint CRE and eICIC scheme for capacity improvement in two-tier heterogeneous networks // Electronics Letters. – 2014. – T. 50, № 24. – P. 1817–1819. – DOI: 10.1049/el.2014.2738.

ПРОМЫШЛЕННОСТЬ И ПРОИЗВОДСТВО

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ХИМИЧЕСКАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

Статья поступила в редакцию: 18.05.2026
Статья принята к публикации: 02.11.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 621.924+662.75

Энергосберегающая микронизация нефтяного кокса в двухроторном конусно-зубчатом гравитационном классификаторе: экспериментальная оценка и сравнение с роторными воздушными классификаторами

Абдуназаров Фахриддин Абдурашитович
д-р философии (PhD)
по техн. наукам, Наманганский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Наманган
E-mail: faxriddin.abdunazarov@bk.ru

Саддиков Фатхиддин Бурхониддинович
д-р филос. (PhD) по техн. наукам, доц.
Наманганский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Наманган

Отамирзаев Самаджон Олимжон угли
преподаватель кафедры химической инженерии
Наманганский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Наманган

Умаров Фахриддин Шаробиддинович
доктор философии (PhD)
по техническим наукам, доц., Наманганский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Наманган

Energy-saving micronization of petroleum coke in a two-rotor conical-toothed gravity classifier: experimental evaluation and comparison with rotary air classifiers

Abdunazarov Fakhriddin Abdurashitovich
doctor of Philosophy (PhD)
in Technical Sciences, Namangan State Technical University
Uzbekistan, Namangan

Библиографическое описание: Энергосберегающая микронизация нефтяного кокса в двухроторном конусно-зубчатом гравитационном классификаторе: экспериментальная оценка и сравнение с роторными воздушными классификаторами // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Абдуназаров Ф.А. [и др.]. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23689

Saddikov Fatkhiddin Burkhoniddinovich
doctor of Philosophy (PhD)
in Technical Sciences, Associate Professor, Namangan State Technical University
Uzbekistan, Namangan
Otamirzaev Samadzhon Olimzhon ugli
lecturer
Department of Chemical Engineering, Namangan State Technical University
Uzbekistan, Namangan
Umarov Fakhriddin Sharobiddinovich
doctor of Philosophy (PhD)
in Technical Sciences, Associate Professor, Namangan State Technical University
Uzbekistan, Namangan

Аннотация

Цель работы — снижение энергозатрат при микронизации нефтяного кокса до частиц размером не более 0,045 мм за счёт совмещения измельчения и классификации в одном аппарате. Разработан двухроторный конусно-зубчатый гравитационный классификатор с одним электродвигателем; экспериментально определены суточное электропотребление установки и традиционной многостадийной линии, влияние частот вращения конуса и барабана и скорости воздуха на эффективность процесса, гранулометрический состав продуктов (ситовой анализ на наборе из 15 сит). Полученные показатели сопоставлены с показателями роторного воздушного классификатора из работы Peng et al. (Processes 2024, 12, 603) — эффективностью по Ньютону (ηN), граничным размером разделения (dc) и точностью классификации (K), используемыми только как независимый внешний эталон. Суточное электропотребление снижено с 3562 до 1510 кВт·ч (в 2,36 раза, на 57,6 %); оптимальные частоты вращения конуса и барабана составляют 750 и 1500 об/мин при скорости воздуха 2–7 м/с, эффективность процесса — 85–95 %; для обоих типов классификаторов эффективность имеет внутренний оптимум по частоте вращения и расходу воздуха. Предложенная конструкция обеспечивает показатели разделения, сопоставимые с эталонными, при более чем двукратном снижении энергопотребления и может служить основой для масштабирования установки.

Abstract

The aim of the study is to reduce energy consumption in the micronization of petroleum coke to particles no larger than 0.045 mm by combining grinding and classification in a single unit. A two-rotor conical-toothed gravity classifier driven by a single electric motor was developed. The daily electricity consumption of the unit and of a conventional multistage line, the effect of the cone and drum rotation speeds and of the air velocity on process efficiency, and the particle-size distribution of the products (sieve analysis with a set of 15 sieves) were determined experimentally. The results were compared with those of the rotor air classifier of Peng et al. (Processes 2024, 12, 603) in terms of Newton efficiency (ηN), cut size (dc) and classification accuracy (K), used only as an independent external benchmark. Daily electricity consumption decreased from 3562 to 1510 kWh (2.36-fold, by 57.6 %). The optimal cone and drum speeds are 750 and 1500 rpm at an air velocity of 2–7 m/s, giving a process efficiency of 85–95 %; for both classifier types the efficiency

has an internal optimum with respect to rotation speed and air flow. The proposed design provides separation indicators comparable to the benchmark with more than a two-fold reduction in energy consumption and can serve as a basis for scaling up the unit.

Ключевые слова: нефтяной кокс, энергосберегающая микронизация, снижение энергопотребления, двухроторный конусно-зубчатый гравитационный классификатор, роторный воздушный классификатор, эффективность классификации по Ньютону, граничный размер разделения, точность классификации.

Keywords: petroleum coke, energy-saving micronization, reduction of energy consumption, two-rotor conical-toothed gravity classifier, rotary air classifier, Newton classification efficiency, cut size, classification accuracy.

1. Введение

Рост объёмов нефтепереработки увеличивает количество нефтяного кокса, создающего экологические и технологические проблемы при хранении, сжигании и переработке; вместе с тем прокалённый кокс является важным промышленным сырьём, в частности в производстве алюминия [5]. Снижение накопления коксовых отходов и получение из них вторичных продуктов — задача национального и международного значения. Превращение кокса в тонкодисперсные порошки с высокой добавленной стоимостью (адсорбенты, строительные материалы, теплостойкие компоненты) представляет значительный экономический интерес.

Получение порошка заданной дисперсности из крупнокускового сырья осуществляется на многостадийных линиях из дробилок, мельниц и классификаторов, которые энергозатратны, сложны в обслуживании и недостаточно экологичны из-за пылевыделения. Для нефтяного кокса типичная технологическая схема (рис. 1) включает крупное дробление, удаление избыточной влаги, вторичное измельчение в сочетании с пневматическим гравитационным классификатором, а также пылеулавливание (циклон и рукавный фильтр). Каждая дополнительная стадия увеличивает общий расход электроэнергии, поэтому сокращение числа стадий за счёт совмещения операций в одном аппарате — основной путь энергосбережения.

Показательным примером современных исследований данного класса оборудования является работа Peng и соавторов по оптимизации рабочих параметров роторного классификатора прокалённого нефтяного кокса. На основе однофакторных и ортогональных экспериментов $L9(3^3)$ авторы определили влияние частоты вращения ротора, объёма подаваемого воздуха и скорости подачи материала на граничный размер разделения (dc), эффективность по Ньютону (ηN) и точность классификации (K) и получили оптимум (1000 об/мин, 500 $м^3 \cdot ч^{-1}$, 0,685 $кг \cdot мин^{-1}$), при котором $\eta N = 83{,}5$ %, $K = 0{,}626$ [9].

Роторные воздушные классификаторы работают на общем физическом принципе: диспергированный материал поступает в классификационную камеру, где частицы испытывают действие силы тяжести, аэродинамического сопротивления и центробежной силы вращающейся роторной клети (рис. 2). Конструкции и режимы работы воздушных

классификаторов исследовались экспериментально и методами численного моделирования [6–8, 10, 11]; в этих работах рассматривается собственно стадия классификации, тогда как совмещение измельчения и классификации в одном аппарате остаётся менее изученным.

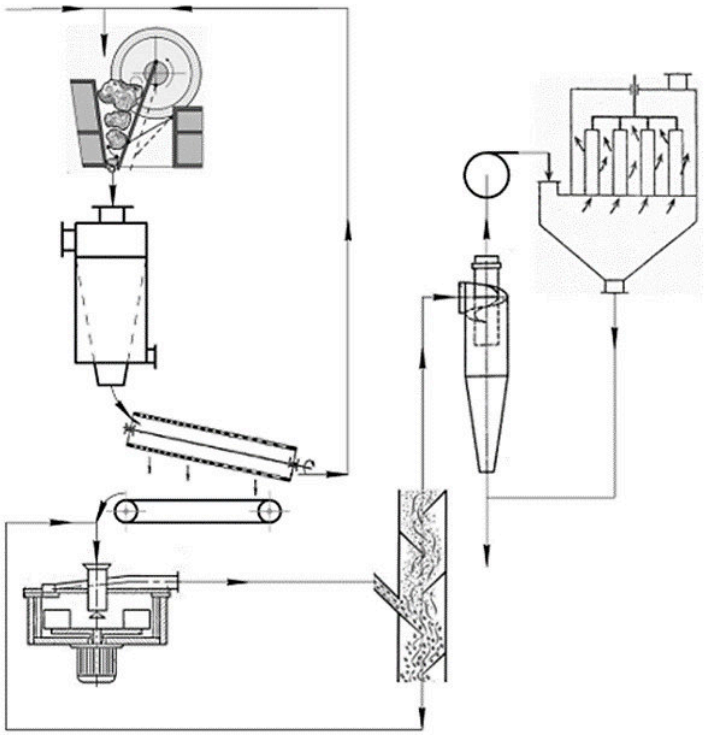


Рисунок 1. Технологическая схема переработки нефтяного кокса и получения порошков заданного дисперсного состава: 1 — крупное дробление (щековая дробилка); 2 — влагоотделитель; 3 — конвейер; 4 — измельчитель (среднее измельчение); 5 — пневматический (гравитационный) классификатор; 6 — циклон; 7 — рукавный фильтр (слева)

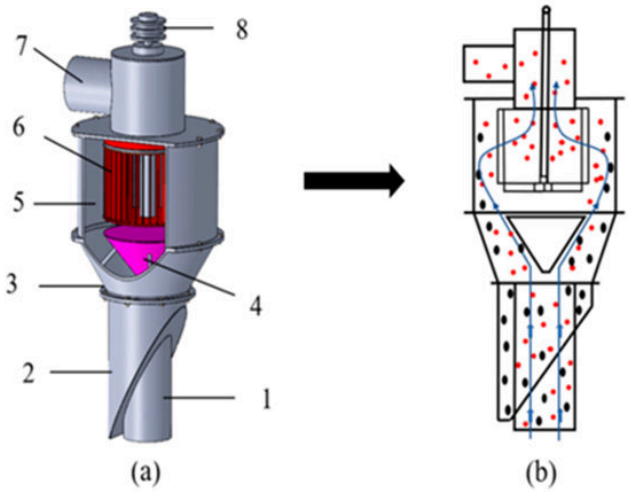


Рисунок 2. Трёхмерная структура (а) и принцип действия (б) роторного классификатора (воспроизведено из [9] для пояснения принципа действия): 1 — вход воздуха и материала, 2 — выход крупного порошка, 3 — конусная зона, 4 — направляющий конус, 5 — классификационная камера, 6 — роторная клеть, 7 — выход воздуха и мелкого порошка, 8 — приводной вал (справа)

Вклад в развитие гравитационных и роторных сепарационных устройств для получения порошковых материалов внесли Зашихин А.В., Усачёв П.А., Мельников Н.Н., Коритный С.Ю., Малёхин Л.А., Сизов, Левданский, Игнатьев, Ярмолик С.В., Барский М.Д., Марков Н.С., Молокеев А.В. и др. Опираясь на этот опыт и собственные разработки [1–4], авторами разработан двухроторный конусно-зубчатый гравитационный классификатор, объединяющий предварительное измельчение конусными зубьями, тонкое измельчение барабанными зубьями и гравитационно-аэродинамическую классификацию в одном агрегате с одним электродвигателем (устройство описано в разд. 2.1).

В ранее опубликованных работах авторов [1–4] представлены лишь отдельные конструктивные решения и предварительные численные оценки; систематическая экспериментальная оценка энергопотребления устройства и его эффективности в общепринятой системе показателей (ηN, dc, K) не проводилась. Новизна работы: впервые (а) получены экспериментальные данные по суточному электропотреблению двухроторного классификатора, совмещающего измельчение и классификацию в одном агрегате, и выполнено сопоставление с традиционной многостадийной линией; (б) экспериментально определены рабочие параметры (частоты вращения конуса и барабана, скорость воздуха), обеспечивающие эффективность процесса 85–95 % при сниженных энергозатратах; (в) результаты интерпретированы в терминах ηN, dc, K и сопоставлены с независимым эталоном [9].

Цель работы — снижение энергозатрат при микронизации нефтяного кокса до частиц не более 0,045 мм за счёт применения двухроторного конусно-зубчатого гравитационного классификатора, совмещающего измельчение и классификацию в одном аппарате. Задачи: описать конструкцию и принцип действия установки; определить суточное электропотребление и сопоставить его с традиционной многостадийной линией; установить влияние частоты вращения роторов и скорости воздуха на эффективность процесса; исследовать гранулометрический состав продуктов; сопоставить показатели ηN, dc, K с эталоном [9] и оценить промышленную применимость.

2. Материалы и методы

2.1. Двухроторный конусно-зубчатый гравитационный классификатор: конструкция и принцип действия

Экспериментальное устройство (рис. 3) представляет собой агрегат с одним электродвигателем, включающий корпус, зону загрузки, большой и малый шнеки подачи и приводы, малый и большой роторы, подвижный и неподвижный зубчатые конусы, конусообразное кольцо, выпускную решётку продукта, подвижный и неподвижный зубчатые барабаны, а также зоны выпуска мелкодисперсной и крупной фаз (нумерация узлов дана в подписи к рис. 3).

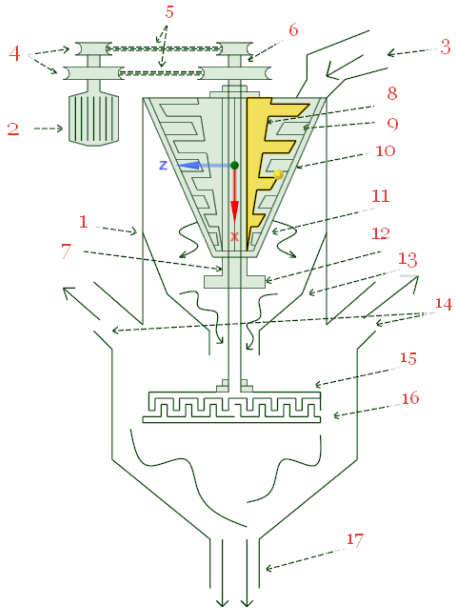


Рисунок 3. Схема двухроторного конусно-зубчатого гравитационного классификатора: корпус 1, электродвигатель 2, зона загрузки 3, большой и малый шнеки 4, большой и малый привод 5, малый ротор 6, большой ротор 7, подвижный зубчатый конус 8, неподвижный зубчатый конус 9, конус 10, выпускная решётка продукта 11, подшипник 12, конусное кольцо 13, зона выпуска 14 (для мелкодисперсной фазы), зубчатый барабан 15 (подвижный), зубчатый барабан 16 (неподвижный), зона выпуска 17 (для крупнодисперсной фазы)

Куски нефтяного кокса диаметром 3–15 см поступают в зону загрузки и захватываются между подвижным конусом (750 об/мин) и неподвижным конусом. Зазор между зубьями сужается сверху вниз, измельчая материал с 3–15 см до 0,5–0,05 мм; продукт через выпускную решётку попадает в конусное кольцо, а затем на стадию зубчатого барабана, где подвижный барабан (1500 об/мин) домалывает частицы о неподвижный до тонкодисперсного состояния. На этой стадии воздушный поток, создаваемый вращением ротора (а не вентилятором), обеспечивает гравитационно-аэродинамическое разделение: мелкая фракция уносится воздухом к циклону через зону выпуска (14), более крупная и тяжёлая отводится вниз через зону (17). Вентилятор на выходе лишь направляет сформированный поток во внешний циклон.

Рисунок 4. Экспериментальная установка: 1 — классификатор; 2 — циклон (слева)

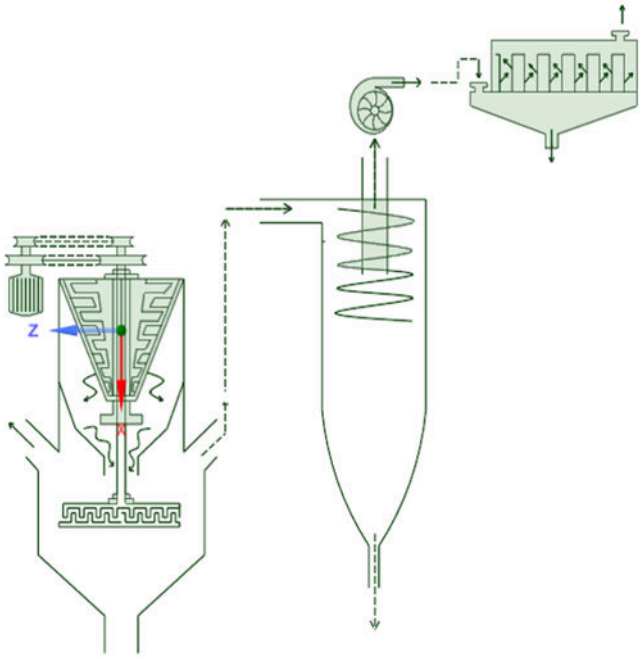


Рисунок 5. Технологическая линия гравитационного классификатора с двумя роторными конусными зубьями: 1 — гравитационный классификатор; 2 — циклон; 3 — рукавный фильтр (справа)

Геометрия зубьев конуса и барабана, сужающихся сверху вниз для минимизации заклинивания и сопротивления вертикальному движению частиц, определена компьютерным моделированием в ANSYS 2025 R2 в сочетании с экспериментами. Зубья изготовлены из износо- и ударостойких легированных и композитных сталей.

Общий вид экспериментальной установки и технологической линии с классификатором, циклоном и рукавным фильтром показан на рис. 4 и 5. Эффективность измельчения и классификации в аппарате зависит от геометрии зубьев, зазора между подвижными и неподвижными зубьями и частот вращения роторов, поэтому основные конструктивные параметры установки приведены в табл. 1.

Таблица 1. Основные конструктивные параметры экспериментальной установки

Параметр	Значение
Привод	один электродвигатель мощностью 50 кВт, КПД 95 %
Частота вращения подвижного зубчатого конуса	750 об/мин
Частота вращения подвижного зубчатого барабана	1500 об/мин
Размер кусков исходного кокса на входе	3–15 см
Размер частиц после конусной ступени	0,5–0,05 мм
Размер частиц после барабанной ступени (целевой)	не более 0,045 мм
Диаметры подвижного и неподвижного конусов (верхний / нижний), мм	500
Число зубьев конусов, высота и шаг зубьев, мм	16–32
Зазор между зубьями конусов (на входе / на выходе), мм	25 / 5
Диаметр и высота зубчатых барабанов, мм	500 / 300
Число зубьев барабанов, высота и шаг зубьев, зазор между барабанами, мм	конус — 16–32 зуба; барабан — 32–64 зуба
Материал и твёрдость зубьев	Износостойкая легированная сталь марки 40Х
Производительность установки, кг/ч	500 кг/ч

Точность изготовления установки: допуск на зазор между подвижными и неподвижными зубьями — ±0,2 мм; радиальное биение роторов — не более 0,05 мм; несоосность конусов и зубчатых барабанов — не более 0,1 мм. Роторы подлежат динамической балансировке по классу точности G 6.3 согласно ГОСТ ISO 21940-11.

2.2. Методика оценки энергопотребления

Базовым вариантом сравнения служит традиционная многостадийная линия (рис. 1; поз. 1–7): крупное дробление кусков до 150 мм до фракции менее 20 мм в щековой или валковой дробилке, удаление избыточной влаги, конвейерная подача, вторичное измельчение (шаровая или вертикальная мельница) в сочетании с пневматическим гравитационным классификатором, циклон и рукавный фильтр. Контроль влажности необходим, так как влага способствует накоплению пыли, чему благоприятствует жаркий и маловлажный климат Узбекистана.

Основным показателем энергосбережения принято суточное электропотребление $W_{сут}$ (кВт·ч). Оно определялось для двухроторного классификатора (вместе с циклоном) и для традиционной многостадийной линии того же назначения — получения порошка нефтяного кокса крупностью не более 0,045 мм (щековая дробилка, конвейер, измельчитель, пневматический классификатор, циклон, рукавный фильтр). Потребляемая мощность привода рассчитывалась по номинальной (допустимой) мощности электродвигателя:

$$P_{потр} = \frac{N_{дв}}{\eta_{дв}} \quad (1)$$

где $N_{дв}$ — номинальная мощность электродвигателя, кВт; $\eta_{дв}$ — его КПД.

Суточное электропотребление линии при непрерывной работе в течение 24 ч:

$$W_{\text{сут}} = \sum_i P_i \cdot t_i \quad (2)$$

где P_{i} — потребляемая мощность i-го агрегата, кВт; t_{i} — время его работы в сутки, ч. Степень энергосбережения характеризовали кратностью снижения электропотребления

$$k_{\text{э}} = \frac{W_{\text{тр}}}{W_{\text{дк}}} \quad (3)$$

и относительной экономией электроэнергии

$$\delta = \frac{W_{\text{тр}} - W_{\text{дк}}}{W_{\text{тр}}} \cdot 100\ \% \quad (4)$$

где $W_{\text{тр}}$ и $W_{\text{дк}}$ — суточное электропотребление традиционной линии и двухроторного классификатора с циклоном соответственно, кВт·ч.

2.3. Методика проведения экспериментов и ситового анализа

Использовались образцы нефтяного кокса начальным диаметром 1–25 см. Эксперименты планировались для изучения влияния (i) частоты вращения конусных и барабанных зубьев и (ii) скорости воздушного потока по сечению классификатора на эффективность процесса (по аналогии с однофакторной схемой [9]): в каждой серии опытов варьировался один фактор при неизменных остальных. Эффективность процесса определялась как доля массы материала, измельчённого до целевого диапазона размеров, в общей массе переработанного материала по результатам ситового анализа.

Источник данных ситового анализа. Все данные по гранулометрическому составу получены на экспериментальной установке (рис. 4). Для анализа отбирались пробы продуктов классификатора: тонкой фракции, уносимой воздухом через зону выпуска 14 (после циклона), и крупной фракции, отводимой через зону выпуска 17. Ситовой анализ выполнялся на наборе из 15 стандартных сит (4–0,045 мм) на автоматическом просеивающем аппарате AS 200: навески 500 г просеивались 20 мин, каждое измерение повторялось не менее трёх раз с усреднением. Размер частицы неправильной формы принимался равным среднему геометрическому трёх главных измерений:

$$d = \sqrt[3]{l \cdot b \cdot h} \quad (5)$$

где l, b, h — длина, ширина и высота частицы. Средний размер каждой ситовой фракции определялся как

$$\overline{d_i} = \frac{d_{max,i} + d_{min,i}}{2} \quad (6)$$

где $d_{\text{max,i}}$, $d_{\text{min,i}}$ — размеры отверстий верхнего и нижнего сит i-й фракции; средневзвешенный размер смеси —

$$d_{\text{ср}} = \frac{\sum_i \overline{d}_i w_i}{\sum_i w_i} \tag{7}$$

где w_i — массовая доля i-й фракции. По результатам ситового анализа строились гранулометрические характеристики продуктов, по которым определялись граничный размер разделения и характер распределения частиц по крупности (разд. 3.4). Суточное электропотребление определялось по методике разд. 2.2.

2.4. Показатели эффективности классификации, используемые для сопоставления с [9]

Показатели ηN, dc и K определены в той же постановке, что и в независимой работе [9]; данные [9] используются исключительно как внешний эталон и не являются результатами авторов. Применимость этой системы показателей к двухроторному устройству обусловлена тем, что разделение в зоне барабанных зубьев определяется тем же балансом сил (тяжести, аэродинамического сопротивления и центробежной), что и в роторных воздушных классификаторах [9].

Для корректного сопоставления с эталонным роторным классификатором [9] применены те же три показателя эффективности. Эффективность классификации по Ньютону:

$$\eta_N = \eta_B + \eta_C - 1 \tag{8}$$

где η_B и η_C — степени извлечения крупного и мелкого порошка, т.е. отношения массы соответствующих частиц в своём продукте к их массе в исходном материале [9]:

$$\eta_B = \frac{m_{B,к}}{m_{B,0}} \tag{9}$$

$$\eta_C = \frac{m_{C,т}}{m_{C,0}} \tag{10}$$

где $m_{B,к}$ и $m_{B,0}$ — масса крупных частиц в крупном продукте и в исходном материале; $m_{C,т}$ и $m_{C,0}$ — масса мелких частиц в тонком продукте и в исходном материале. Граничный размер разделения d_c — размер частиц, соответствующий 50 %-ной степени извлечения на кривой частной эффективности (кривой Тромпа) $T(d)$, т.е. размер, при котором частица с равной вероятностью попадает в мелкий и крупный продукт [9]:

$$T(d_c) = 0,5 \tag{11}$$

Точность классификации:

$$K = \frac{d_{25}}{d_{75}} \tag{12}$$

где d_{25} и d_{75} — размеры частиц, соответствующие 25 % и 75 % частной эффективности; K стремится к единице при идеально чётком разделении [9].

Для двухроторного устройства сопоставление выполнено по показателю «эффективность процесса» (разд. 2.3), а d_c и характер распределения определены по результатам ситового анализа. Поскольку показатель «эффективность процесса» не тождествен η_N, сопоставление с [9] носит ориентировочный характер.

3. Результаты

Результаты разд. 3.1–3.4 получены авторами на экспериментальной установке (рис. 4). Главный показатель энергосберегающей конструкции — суточное электропотребление — рассмотрен первым (разд. 3.1); далее приведены влияние режимных параметров на эффективность процесса (разд. 3.2, 3.3) и гранулометрический состав продукта (разд. 3.4). Сопоставление с независимой работой [9] вынесено в разд. 4 (Обсуждение).

3.1. Энергопотребление двухроторного классификатора и традиционной линии

В таблицах 2 и 3 приведено суточное электропотребление традиционной многостадийной линии (щековая дробилка, конвейер, измельчитель, пневматический классификатор, циклон, рукавный фильтр) и двухроторного классификатора соответственно (ГОСТ 12.1.038 – 82).

Таблица 2. Суточное энергопотребление традиционной линии измельчения нефтяного кокса (ГОСТ 12.1.038 – 82)

Оборудование	Мощность × время работы, кВт·ч	КПД	Суточное энергопотребление
Щековая дробилка (100 кВт)	100 кВт × 24 ч = 2400 кВт·ч	85–95 %	
Конвейер (5 кВт)	5 кВт × 24 ч = 120 кВт·ч	85–95 %	
Измельчитель (50 кВт)	50 кВт × 24 ч = 1200 кВт·ч	85–95 %	
Пневматический классификатор (20 кВт)	20 кВт × 24 ч = 480 кВт·ч	85–95 %	
Циклон (10 кВт)	10 кВт × 24 ч = 240 кВт·ч	85–95 %	
Рукавный фильтр (3 кВт)	3 кВт × 24 ч = 72 кВт·ч	85–95 %	**Итого: 3562 кВт·ч**

Таблица 3. Суточное энергопотребление двухроторного конусно-зубчатого гравитационного классификатора (ГОСТ 12.1.038 – 82)

Оборудование	Мощность × время работы, кВт·ч	Энергоэффективность	Суточное энергопотребление
Двухроторный конусно-зубчатый гравитационный классификатор + циклон	52,63 кВт × 24 ч = 1263,2 кВт·ч	90 %	**1510 кВт·ч**

Двигатель двухроторного классификатора имеет мощность 50 кВт при КПД 95 %, поэтому по формуле (1) потребляемая мощность составляет

$$P_{\text{потр}} = \frac{50}{0,95} \approx 52,63 \text{ кВт}$$

Суточное электропотребление двухроторного классификатора с циклоном равно 1510 кВт·ч (табл. 3), традиционной линии — 3562 кВт·ч (табл. 2). По формулам (3) и (4) кратность снижения и относительная экономия электроэнергии составляют

$$k_э = \frac{3562}{1510} \approx 2,36$$

$$\delta = \frac{3562 - 1510}{3562} \cdot 100\,\% \approx 57,6\,\%$$

Таким образом, суточное электропотребление двухроторного классификатора с циклоном в 2,36 раза ниже, чем у традиционной линии (экономия 57,6 %).

3.2. Влияние частоты вращения роторов на измельчение и классификацию частиц

При рабочей точке, установленной экспериментально (конус 750 об/мин, барабан 1500 об/мин), 85–95 % материала измельчалось до целевого диапазона размеров, а сама барабанная стадия достигала эффективности 85–92 %. Отклонение частот вращения от этой точки в обе стороны снижало эффективность процесса.

3.3. Влияние скорости воздушного потока на эффективность разделения

Воздушный поток в зоне выпуска формируется преимущественно вращением ротора, а не вентилятором; при 1500 об/мин создаваемый ротором поток способен поднимать лёгкие частицы на высоту до 1,5 м. Варьирование скорости воздуха по сечению классификатора (2–7 м/с) показало, что скорости 0,8–1,2 м/с обеспечивали наивысшую эффективность разделения преобладающей мелкой фракции, а общая эффективность процесса 85–95 % достигалась в диапазоне 2–7 м/с.

3.4. Гранулометрический состав продукта

Гранулометрический состав продуктов определялся ситовым анализом по методике разд. 2.3 (собственные данные авторов). Ситовой анализ в оптимальной рабочей точке (эквивалент 1000 об/мин, скорость воздуха 2 м/с) показал, что поток крупной фракции сосредоточен в диапазоне 1–4 мм (66,2 % по балансовой массе в интервале 2–4 мм), а мелкой — в диапазоне 0,063–0,25 мм (26,3 % и 31,0 % в интервалах 0,125–0,25 и 0,063–0,125 мм) с мелким «хвостом» до границы 0,045 мм. Двухстадийное измельчение «конус — барабан» даёт бимодальное распределение по крупности.

4. Обсуждение

В данном разделе результаты разд. 3 интерпретируются и сопоставляются с независимой работой [9], данные которой используются исключительно как внешняя система сравнения (ηN, dc, K); рисунки и таблица, построенные по этим данным, имеют в подписях пометку «данные [9]» и не являются результатами авторов.

4.1. Интерпретация результатов

Снижение электропотребления в 2,36 раза (разд. 3.1) объясняется объединением крупного и тонкого измельчения и классификации в одном агрегате с одним электродвигателем: исключаются отдельные энергопотребляющие стадии (мельница, пневматический классификатор, конвейерное оборудование), необходимые при использовании роторного классификатора [9] как ступени после традиционного измельчения.

Рост частоты вращения конуса усиливает столкновения частиц друг с другом и с зубьями, продвигая материал к сужающемуся зазору и сокращая время пребывания перед барабанной стадией. Снижение эффективности при отклонении от рабочей точки (разд. 3.2) объясняется тем, что при пониженных частотах материал не успевает продвигаться в зазор, а при повышенных возрастает доля переизмельчённой и повторно уносимой воздухом фракции.

Бимодальное распределение продукта по крупности (разд. 3.4) характерно для эффективного разделения на крупную и мелкую фракции и является следствием двухстадийного измельчения «конус — барабан».

4.2. Сопоставление с эталонными показателями роторного воздушного классификатора [9]

Рис. 6–9 построены по данным независимой работы [9] и воспроизводятся с указанием источника. Результаты разд. 3.1–3.4 интерпретируются в свете закономерностей, установленных в [9] для роторного классификатора прокалённого кокса. По данным [9], граничный размер разделения dc монотонно снижался со 134,6 мкм при 600 об/мин до 44 мкм при 1400 об/мин, тогда как ηN и K проходили через максимум при 1000 об/мин и снижались при более высоких частотах, поскольку чрезмерное центробежное поле дестабилизирует поле течения и увеличивает отскок частиц (рис. 6–7, перестроены по данным [9]). Двухроторное устройство демонстрирует аналогичный немонотонный оптимум: рабочие частоты (750/1500 об/мин) определены эмпирически совместно с геометрией зубьев, однако лежащий в их основе механизм — нарастающая интенсивность измельчения, выходящая на плато по мере выравнивания передачи частиц между конусной и барабанной ступенями, — согласуется с объяснением через центробежное силовое поле [9].

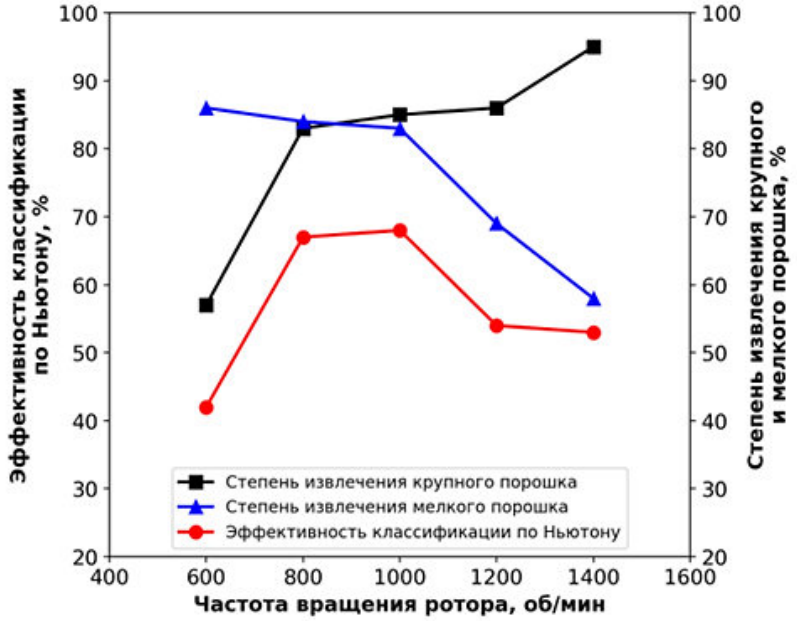


Рисунок 6. Эффективность классификации по Ньютону и степень извлечения крупного и мелкого порошка при разных частотах вращения ротора роторного воздушного классификатора (данные [9]) (слева)

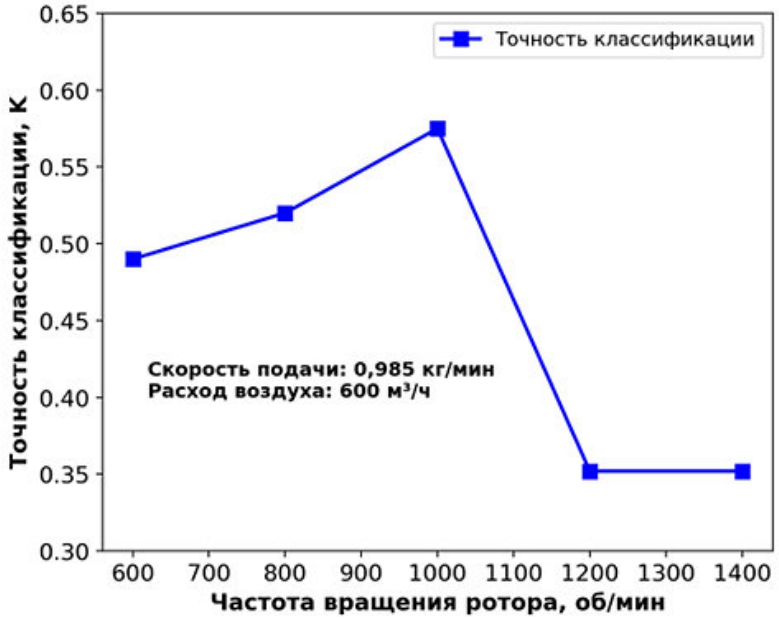


Рисунок 7. Точность классификации при разных частотах вращения ротора (данные [9]) (справа)

Аналогичная закономерность отмечена для расхода воздуха: в [9] увеличение объёма воздуха с 400 до 800 м³·ч⁻¹ монотонно повышало степень извлечения мелкого порошка ηC, но резко снижало степень извлечения крупного порошка ηB, поэтому ηN и K достигали максимума при 500 м³·ч⁻¹ (ηN = 76,8 % против 70,3 %, 68,2 %, 52,5 % и 45,7 % при 400, 600, 700 и 800 м³·ч⁻¹ соответственно), а граничный размер dc непрерывно увеличивался (рис. 8, по данным [9]); влияние скорости подачи материала показано на рис. 9. Диапазон скоростей воздуха 2–7 м/с (оптимум 0,8–1,2 м/с для мелкой фракции), установленный в разд. 3.2,

качественно повторяет эту тенденцию — наличие внутреннего оптимума, обусловленного компромиссом между диспергированием частиц при умеренном потоке и ошибочной классификацией из-за сопротивления при высоком потоке.

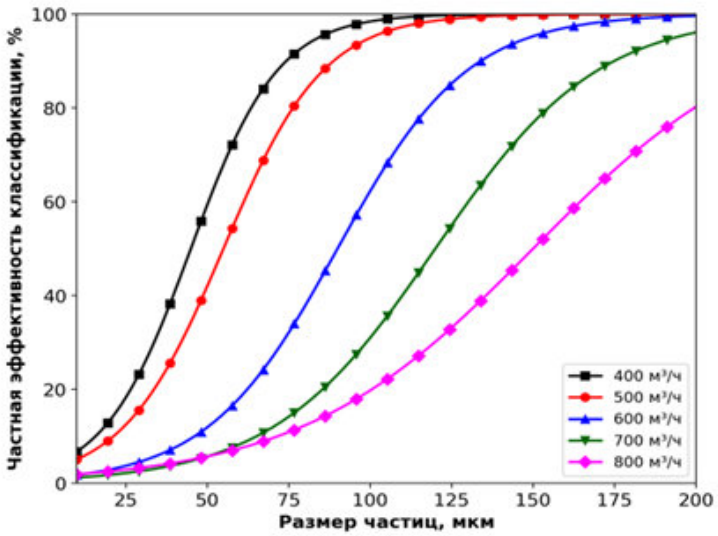


Рисунок 8. Кривые частной эффективности классификации при разных объёмах подаваемого воздуха (данные [9]) (слева)

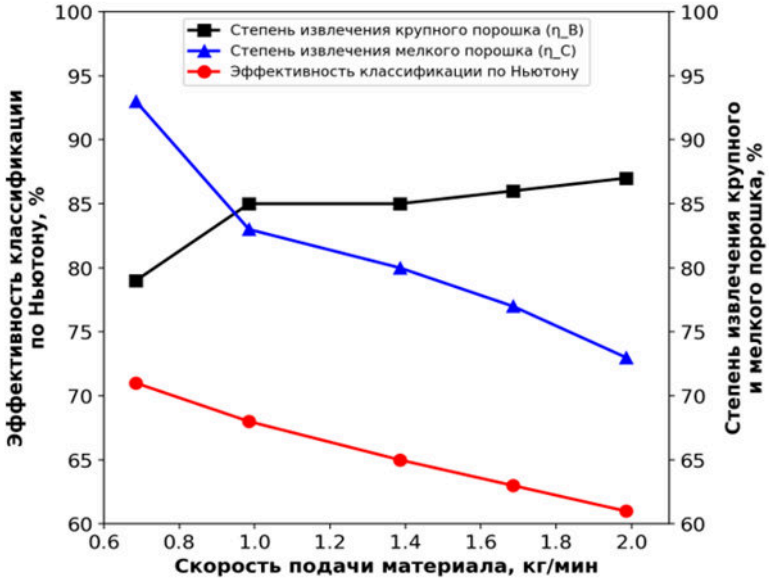


Рисунок 9. Эффективность классификации по Ньютону и степень извлечения при разных скоростях подачи материала (данные [9], график перестроен на русском языке) (справа)

В таблице 4 сопоставлены два устройства в единой системе показателей: значения для роторного классификатора взяты из оптимальной точки [9], для двухроторного — из собственных экспериментов (разд. 3.1–3.3).

Таблица 4. Сравнительная сводка показателей эффективности классификации

Показатель эффективности	**Роторный воздушный классификатор (прокалённый нефтяной кокс) [9]**	**Двухроторный конусно-зубчатый гравитационный классификатор (данная работа)**
Оптимальная частота вращения	1000 об/мин (один ротор)	750 об/мин (конус) / 1500 об/мин (барабан)
Оптимальный расход воздуха	500 м³·ч⁻¹	2–7 м/с (0,8–1,2 м/с для преобладающей мелкой фракции)
Эффективность классификации по Ньютону, ηN	83,5 %	85–92 % (эффективность процесса)
Точность классификации, K	0,626	Бимодальное разделение подтверждено ситовым анализом (качественно)
Граничный размер разделения, dc	52,3 мкм	45–63 мкм (0,045–0,063 мм)
Целевое применение	Прокалённый кокс анодного качества (~18 мкм средний размер)	Адсорбенты, строительные и теплостойкие материалы

Из таблицы 4 следуют два вывода. Во-первых, граничный размер разделения и эффективность двухроторного классификатора сопоставимы с эталонными показателями [9], хотя устройство выполняет совмещённое измельчение и классификацию, а не только классификацию; следует учитывать, что для двухроторного устройства приведена эффективность процесса (доля материала, измельчённого до целевого диапазона), не тождественная ηN, поэтому сравнение носит ориентировочный характер. Во-вторых, оптимальные рабочие диапазоны обеих машин — промежуточная частота вращения и промежуточный расход воздуха — указывают на общий принцип: эффективность разделения в центробежных и гравитационных сепараторах определяется балансом между движущей силой разделения и дестабилизирующим влиянием избыточной турбулентности, а не простым увеличением частоты вращения или расхода воздуха. Совпадение качественных закономерностей на двух независимо разработанных устройствах разной конструкции согласуется с общностью физических принципов. При этом главное преимущество предложенной конструкции — энергетическое: при сопоставимых показателях разделения суточное электропотребление снижено более чем в 2 раза (разд. 3.1).

4.3. Ограничения и перспективы

Ограничения работы: (i) показатель «эффективность процесса» не тождествен ηN, поэтому сопоставление с [9] носит ориентировочный характер, а для строгого сопоставления необходимо построить кривую частной эффективности (Тромпа) двухроторного устройства и определить ηN и K; (ii) эталон [9] получен для прокалённого кокса анодного качества со средним размером частиц около 18 мкм, тогда как целевой размер продукта в данной работе — до 0,045 мм; (iii) электропотребление определено по номинальным (допустимым) мощностям оборудования, а не по прямым измерениям нагрузки. Перспективы: определение удельного энергопотребления (кВт·ч/т) по данным производительности установки и испытания в промышленном масштабе.

5. Заключение

1. Разработан и экспериментально исследован двухроторный конусно-зубчатый гравитационный классификатор, объединяющий крупное измельчение конусными зубьями, тонкое измельчение барабанными зубьями и гравитационно-аэродинамическую классификацию в одном агрегате с одним электродвигателем для микронизации нефтяного кокса до частиц не более 0,045 мм.

2. Главный результат — энергосбережение: суточное электропотребление снижено с 3562 до 1510 кВт·ч, т.е. в 2,36 раза (на 57,6 %) по сравнению с традиционной многостадийной линией за счёт исключения отдельных стадий помола, транспортировки и классификации.

3. Эффективность процесса 85–95 % достигается при частоте вращения конусных зубьев 750 об/мин, барабанных зубьев 1500 об/мин и скорости воздуха 2–7 м/с; барабанная ступень измельчения достигает эффективности 85–92 %. Двухстадийное измельчение «конус — барабан» даёт бимодальное распределение продукта по крупности.

4. Сопоставление с роторным воздушным классификатором [9] в системе показателей (ηN, dc, K) показало, что оба устройства имеют немонотонную зависимость эффективности от частоты вращения и расхода воздуха с внутренним оптимумом; эффективность (85–92 %) и граничный размер разделения (45–63 мкм) двухроторного классификатора сопоставимы с эталонными значениями [9] (ηN = 83,5 %, K = 0,626, dc = 52,3 мкм), причём предложенный аппарат выполняет и измельчение, и классификацию. Сопоставление ориентировочное, так как сравниваемые показатели не тождественны.

5. Полученные результаты служат основой для масштабирования установки как энергосберегающей альтернативы традиционным многостадийным промышленным линиям.

Список литературы

1. Абдуназаров, Ф.А. Численное моделирование поведения нефтяного кокса в программе ANSYS / Ф.А. Абдуназаров, А.А. Худайбердиев // XXVII Международная научно-практическая конференция «Инновация». – 2023. – С. 279–281.
2. Абдуназаров, Ф.А. Technology for separating powdered materials from petroleum coke using a two-rotor gravity classifier / Ф.А. Абдуназаров, А.А. Худайбердиев // E3S Web of Conferences. – 2024. – Т. 486. – Art. 01018. – DOI: 10.1051/e3sconf/202448601018.
3. Абдурахмонов, Э.Б. Технология получения порошкообразных материалов из отработанных нефтепродуктов и гранитных изделий в строительной отрасли / Э.Б. Абдурахмонов, Ф.А. Абдуназаров // Universum: технические науки. – 2022. – № 3–4 (96). – С. 59–67.
4. Мамаджанов, З.Н. Центробежная мельница с классификатором слоистого потока для использования в производстве порошкового нефтяного кокса в Узбекистане / З.Н. Мамаджанов, Ф.А. Абдуназаров, И.Т. Рустамов // Universum: технические науки. – 2022. – № 3–5 (96). – С. 23–28.
5. Edwards, L. The History and Future Challenges of Calcined Petroleum Coke Production and Use in Aluminum Smelting / L. Edwards // JOM. – 2015. – Т. 67. – P. 308–321.

6. Jia, F. A New Rotor-Type Dynamic Classifier: Structural Optimization and Industrial Applications / F. Jia, X. Mou, Y. Fang, C. Chen // Processes. – 2021. – T. 9.
7. Karunakumari, L. Experimental and numerical study of a rotating wheel air classifier / L. Karunakumari, C. Eswaraiah, S. Jayanti, S.S. Narayanan // AIChE Journal. – 2005. – T. 51. – P. 776–790.
8. Kundu, T. Performance evaluation of the VSK separator for treating mineral fines / T. Kundu, S.K. Das, S.K. Tripathy, S.I. Angadi // Minerals Engineering. – 2021. – T. 167. – Art. 106883.
9. Peng, J. Research and Optimization of Operating Parameters of a Rotor Classifier for Calcined Petroleum Coke / J. Peng, C. Hui, Z. Zhao, Y. Fang // Processes. – 2024. – T. 12. – DOI: 10.3390/pr12030603.
10. Shapiro, M. Air classification of solid particles: A review / M. Shapiro, V. Galperin // Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. – 2005. – T. 44. – P. 279–285.
11. Sun, Z. CFD simulation and performance optimization of a new horizontal turbo air classifier / Z. Sun, L. Liang, C. Liu, Y. Zhu, L. Zhang, G. Yang // Advanced Powder Technology. – 2021. – T. 32. – P. 977–986.

References

1. Abdunazarov F.A., Khudaiberdiev A.A. [Technology for separating powdered materials from petroleum coke using a two-rotor gravity classifier. E3S Web of Conferences 486, 01018 (2024), AGRITECH-IX]. – 2023. – DOI: 10.1051/e3sconf/202448601018. (In Russ.).
2. Abdunazarov F.A., Khudajberdiev A.A. [Numerical modeling of petroleum coke behavior in ANSYS. XXVII International Scientific and Practical Conference 'Innovation', P. 279–281]. – 2023. (In Russ.).
3. Abdurakhmonov E.B., Abdunazarov F.A. [Technology for producing powdered materials from waste petroleum products and granite products in the construction industry. Universum: Technical Sciences 2022, 3–4(96), 59–67] (In Russ.).
4. Mamadzhanov Z.N., Abdunazarov F.A., Rustamov I.T. [Centrifugal mill with a stratified-flow classifier for use in the production of powdered petroleum coke in Uzbekistan. Universum: Technical Sciences 2022, 3–5(96), 23–28] (In Russ.).
5. Edwards, L. The History and Future Challenges of Calcined Petroleum Coke Production and Use in Aluminum Smelting. JOM 2015, 67, 308–321.
6. Jia F., Mou X., Fang Y., Chen C. A New Rotor-Type Dynamic Classifier: Structural Optimization and Industrial Applications // Processes. – 2021. – Vol. 9.
7. Karunakumari L., Eswaraiah C., Jayanti S.; Narayanan S.S. Experimental and numerical study of a rotating wheel air classifier. AIChE J. 2005, 51, 776–790.
8. Kundu, T.; Das S.K.; Tripathy S.K.; Angadi S.I. Performance evaluation of the VSK separator for treating mineral fines. Miner. Eng. 2021, 167, 106883.
9. Peng J., Hui C., Zhao Z., Fang Y. Research and Optimization of Operating Parameters of a Rotor Classifier for Calcined Petroleum Coke // Processes. – 2024. – Vol. 12. – DOI: 10.3390/pr12030603.

10. Shapiro M., Galperin V. Air classification of solid particles: A review. Chem. Eng. Process. Process Intensif. 2005, 44, 279–285.
11. Sun Z., Liang L., Liu C., Zhu Y., Zhang L., Yang G. CFD simulation and performance optimization of a new horizontal turbo air classifier. Adv. Powder Technol. 2021, 32, 977–986.

Статья поступила в редакцию: 01.10.2026
Статья принята к публикации: 10.11.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 66.021.3+54.05

DOI: 10.32743/UniTech.2026.152.11.23707

Исследование магнийсодержащего осадка, полученного из рапы Караумбетского соляного месторождения при обработке карбонатом натрия

Жугинисов Бердах Байрамбаевич
докторант
Каракалпакский государственный университет имени Бердаха
Республика Узбекистан, г. Нукус
E-mail: berdakh.juginisov@gmail.com
Реймов Ахмед Мамбеткаримович
акад., д-р техн. наук
председатель Каракалпакского отделения Академии наук Республики Узбекистан
Республика Узбекистан, г. Нукус
Эркаев Актам Улашевич
д-р техн. наук, проф.
Ташкентский химико-технологический институт, Республика Республика Узбекистан
г. Ташкент
Кошанова Бибигул Турганбаевна
DSc, доц.
Ташкентский химико-технологический институт, Республика Республика Узбекистан
г. Ташкент

Characterization of a magnesium-containing precipitate obtained from Karaumbet salt deposit brine by sodium carbonate treatment

Zhuginisov Berdakh Bayrambaevich
Doctoral researcher
Karakalpak State University named after Berdakh
Uzbekistan, Nukus
Reymov Akhmed Mambetkarimovich
Academician, Doctor of Technical Sciences
Chairman of the Karakalpak Branch of the Academy of Sciences of Uzbekistan
Uzbekistan, Nukus
Erkaev Aktam Ulashevich
doctor of Technical Sciences, Professor
Tashkent Institute of Chemical Technology
Uzbekistan, Tashkent

Библиографическое описание: Исследование магнийсодержащего осадка, полученного из рапы Караумбетского соляного месторождения при обработке карбонатом натрия // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Жугинисов Б.Б. [и др.]. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23707

Koshanova Bibigul Turganbayevna
doctor of Technical Sciences, Associate Professor
Tashkent Institute of Chemical Technology
Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

Цель исследования – оценить образование магнийсодержащего осадка из рапы Караумбетского соляного месторождения карбонатом натрия и охарактеризовать образующуюся твёрдую фазу. В работе использованы результаты анализа рапы, стехиометрический расчёт расхода реагента, сканирующая электронная микроскопия и энергодисперсионный рентгеновский микроанализ. В исследованной пробе при плотности 1,21 г/см³ установлены массовые доли $MgSO_4$ 1,44 %, $MgCl_2$ 7,82 %, NaCl 16,46 % и $CaSO_4$ 0,10 %. Для условной навески рапы массой 100 г рассчитано суммарное количество магния 0,09409 моль и теоретическая потребность в безводном Na_2CO_3 9,97 г. Осаждение проводили при 90 °C в течение 60 мин. СЭМ-исследование выявило дисперсные частицы неправильной и близкой к округлой форме, объединённые в агрегаты. По результатам локального ЭДС-анализа установлены массовые доли Mg 30,85 %, O 48,79 %, C 18,21 %, Ca 1,32 %, S 0,51 % и Cl 0,33 %. Полученные данные свидетельствуют об образовании магнийсодержащего осадка и позволяют оценить перспективность применения местной рапы в качестве сырья. Вместе с тем данные СЭМ-ЭДС недостаточны для однозначного подтверждения структуры конкретного гидратированного карбоната магния и расчёта фактической степени извлечения. Для технологической верификации необходимы рентгенофазовый анализ, термический анализ, определение остаточного магния в фильтрате и материальный баланс.

Abstract

The aim of this study was to assess the formation of a magnesium-containing precipitate from Karaumbet salt deposit brine using sodium carbonate and to characterize the resulting solid phase. The work employed brine composition data, stoichiometric reagent calculations, scanning electron microscopy (SEM), and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS). The investigated brine, with a density of 1.21 g/cm³, contained 1.44 wt.% $MgSO_4$, 7.82 wt.% $MgCl_2$, 16.46 wt.% NaCl, and 0.10 wt.% $CaSO_4$. For a 100 g brine basis, the total amount of magnesium was calculated as 0.09409 mol, corresponding to a theoretical requirement of 9.97 g of anhydrous Na_2CO_3. Precipitation was performed at 90 °C for 60 min. SEM micrographs revealed irregular and approximately rounded dispersed particles that formed aggregates. Local EDS analysis indicated mass fractions of 30.85 % Mg, 48.79 % O, 18.21 % C, 1.32 % Ca, 0.51 % S, and 0.33 % Cl. The results demonstrate the formation of a magnesium-containing precipitate and support the potential use of local brine as a raw material. However, SEM-EDS data alone cannot establish the exact hydrated magnesium carbonate phase or the actual magnesium recovery. X-ray diffraction, thermal analysis, measurement of residual magnesium in the filtrate, and a complete mass balance are needed for process validation.

Ключевые слова: Караумбетское месторождение, рапа, карбонат натрия, магнийсодержащий осадок, карбонаты магния, СЭМ-ЭДС, осаждение.

Keywords: Karaumbet deposit, brine, sodium carbonate, magnesium-containing precipitate, magnesium carbonates, SEM-EDS, precipitation.

Введение

Высокоминерализованные природные рассолы представляют интерес как источник магния и других солевых компонентов. Их переработка может уменьшать объёмы отводимых растворов и расширять сырьевую базу производства неорганических веществ. Исследования солей озёр Караумбет и Барсакельмес показали наличие предпосылок для извлечения магниевых соединений; в ранее опубликованной работе по местным рассолам рассмотрено предварительное удаление сульфатов с применением отходов содового производства [1, 2].

Международные исследования подтверждают технологический интерес к комплексному извлечению магния из рассолов, однако выбор осадителя и условия кристаллизации определяют состав и морфологию выделяющегося продукта. В обзоре Fontana и соавт. [4] рассмотрены методы извлечения магния из концентрированных рассолов. Bouaziz и соавт. [3] продемонстрировали, что селективное разделение магния и кальция требует последовательного управления составом раствора и режимом осаждения.

Механизмы образования карбонатов магния сложнее соответствующих процессов для кальция вследствие образования гидратированных и промежуточных фаз [9]. Ojeda Villegas и соавт. [8] при осаждении магния карбонатом натрия обнаружили малоупорядоченную магнийсодержащую фазу, для идентификации которой применяли совокупность рентгенофазового, термического и электронно-микроскопического методов. Santos и соавт. [10] показали, что сульфат-ионы способны изменять кинетику кристаллизации и состав осадка; это важно для сульфатно-хлоридных природных рассолов.

Для практической переработки рапы Караумбетского месторождения необходимо разграничить результаты химического осаждения и доказательство образования конкретной товарной фазы.

Цель работы - рассчитать теоретическую потребность в Na_2CO_3 по исходному составу рапы, описать условия получения осадка и оценить его морфологию и локальный элементный состав методами СЭМ-ЭДС. При этом идентификация точной кристаллической формы магниевого соединения рассматривается как отдельная задача последующей проверки.

Материалы и методы

Объект исследования – межкристаллическая рапа Караумбетского соляного месторождения (Республика Каракалпакстан). Использованы результаты химического анализа пробы, выполненного в июле 2026 г. Плотность рапы составляла 1,21 г/см³. В исходном лабораторном описании состав представлен в форме расчётных солей $MgSO_4$, $MgCl_2$, NaCl и $CaSO_4$; остальные компоненты и вода отдельно не определены. Поэтому приведённый анализ не следует трактовать как полный ионный баланс.

Предмет исследования – осаждение магнийсодержащей твёрдой фазы под действием Na_2CO_3, её морфология и локальный элементный состав. Определение промышленной степени демагнизации в рамках представленной серии данных не проводилось.

Таблица 1. Состав исследованной пробы рапы Караумбетского соляного месторождения

№	Компонент	Формула	Содержание, масс. %
1	Сульфат магния	$MgSO_4$	1,44
2	Хлорид магния	$MgCl_2$	7,82
3	Хлорид натрия	NaCl	16,46
4	Сульфат кальция	$CaSO_4$	0,10

Для расчёта теоретической потребности в соде за основу принята навеска рапы массой 100 г. Массовые доли $MgSO_4$ и $MgCl_2$ трактовали как содержание соответствующих безводных солей, как принято в исходном анализе.

Схема лабораторной обработки включала приготовление раствора Na_2CO_3, смешивание его с рапой, выдерживание реакционной массы при 90 °C в течение 60 мин, отделение образовавшейся твёрдой фазы фильтрованием, промывку и сушку осадка. Количество Na_2CO_3 в исходной работе принималось равным 100 % расчётной стехиометрической потребности.

Для первичного расчёта химической потребности в реагенте использовано молярное соотношение $n(CO_3^{2-}):n(Mg^{2+}) = 1:1$. Условное суммарное уравнение образования одной из возможных гидратированных основных карбонатных фаз имеет вид:

$$4Mg^{2+} + 4CO_3^{2-} + 4H_2O \rightarrow 3MgCO_3 \cdot Mg(OH)_2 \cdot 3H_2O + CO_2\uparrow. \quad (1)$$

Уравнение (1) является стехиометрической моделью расчёта и само по себе не устанавливает фазовый состав выделившегося осадка. В реальной многокомпонентной системе могут возникать гидратированные карбонаты магния и промежуточные фазы с иной стехиометрией [9].

$$n(MgSO_4) = 1,44 / 120,37 = 0,01196 \text{ моль}; n(MgCl_2) = 7,82 / 95,21 = 0,08213 \text{ моль}. \quad (2)$$

$$n(Mg^{2+}) = 0,01196 + 0,08213 = 0,09409 \text{ моль}. \quad (3)$$

$$m(Na_2CO_3) = 0,09409 \times 105,99 = 9,97 \text{ г на 100 г рапы}. \quad (4)$$

Содержание магния в исходной рапе в пересчёте на элемент составляет расчётно $0,09409 \times 24,305 = 2,29$ г на 100 г рапы, или 2,29 масс. %. Результат (4) соответствует 99,7 кг безводного Na_2CO_3 на 1 т рапы. Это теоретический расход при принятом солевом составе и полной доступности магния для осаждения, но не экспериментально определённая оптимальная доза. В производственных условиях потребление реагента зависит также от примесей, карбонатного равновесия и необходимой остаточной концентрации Mg^{2+}.

Морфологию высушенного осадка исследовали методом сканирующей электронной микроскопии на приборе JEOL в высоковакуумном режиме. В исходном наборе микрофотографий указаны ускоряющее напряжение 3,0 кВ, рабочее расстояние 16,3 мм, детектор вторичных электронов (SED) и увеличения ×500, ×750, ×1100 и ×2700. Локальный

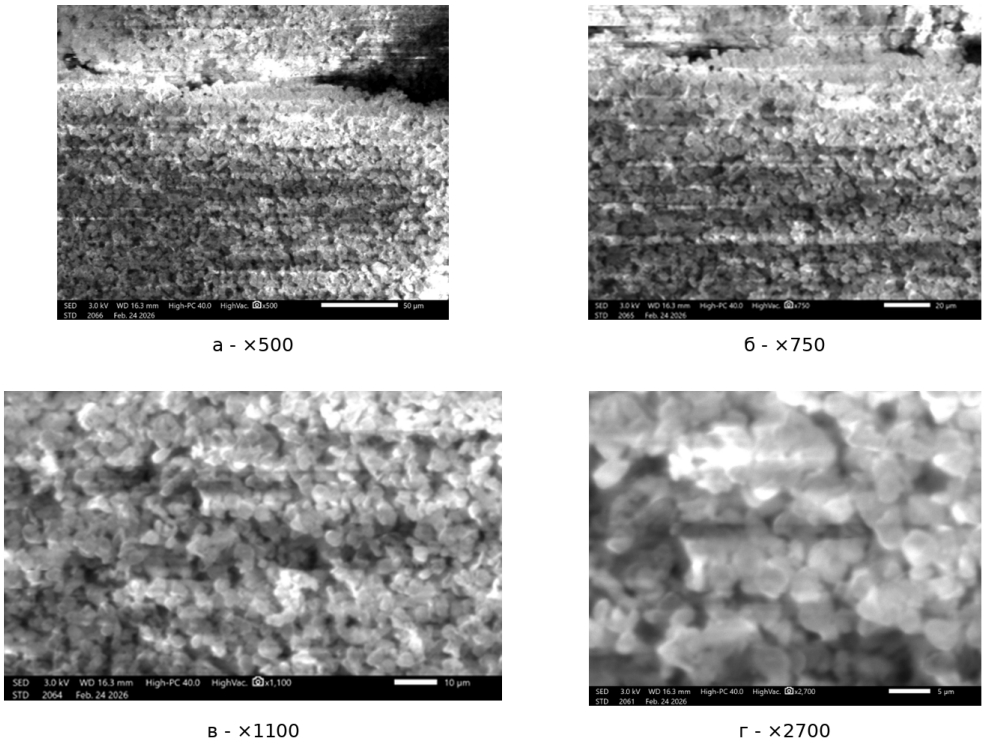
элементный состав изучали энергодисперсионным микроанализом с кремниевым дрейфовым детектором при напряжении 15 кВ, рабочем расстоянии 16,0 мм и времени регистрации 30 с; количественная обработка выполнялась безэталонным методом с ZAF-коррекцией. Значения ЭДС отражают состав анализируемого участка и не заменяют валового химического анализа.

Результаты и обсуждение

По исходному анализу рапы основная доля магния связана с расчётной формой $MgCl_2$: 0,08213 из 0,09409 моль Mg^{2+}, или приблизительно 87,3 % его общего молярного количества. На $MgSO_4$ приходится около 12,7 %. Наличие в системе хлорид- и сульфат-ионов может влиять на пересыщение, зарождение кристаллов и состав выделяемой фазы. Исследования Kasimu и Gu [5] показывают зависимость морфологии осадков из рассолов от содержания NaCl; работа Myung и соавт. [7] также подтверждает значимость ионного состава для селективного осаждения карбонатов.

Принятые 90 °C и 60 мин характеризуют условия данной серии опытов, однако по одному режиму нельзя определить оптимальную температуру, продолжительность или выход продукта. В исследовании Montes-Hernandez [6] при 90 °C для ряда магниевых солей наблюдали фазовые превращения гидратированных карбонатов; их протекание существенно зависело от противоионов и времени. Это подчёркивает необходимость независимой проверки фазового состава исследуемого осадка.

На микрофотографиях (рис. 1) обнаружены мелкодисперсные частицы неправильной и близкой к округлой форме, образующие рыхлые и плотные агрегаты. При увеличении ×2700 более отчётливо видны локальные границы отдельных структурных элементов. При этом по двумерным СЭМ-изображениям нельзя надёжно определить гранулометрическое распределение всей партии, а различия между участками образца не доказывают влияния отдельных технологических параметров.



а - ×500 б - ×750

в - ×1100 г - ×2700

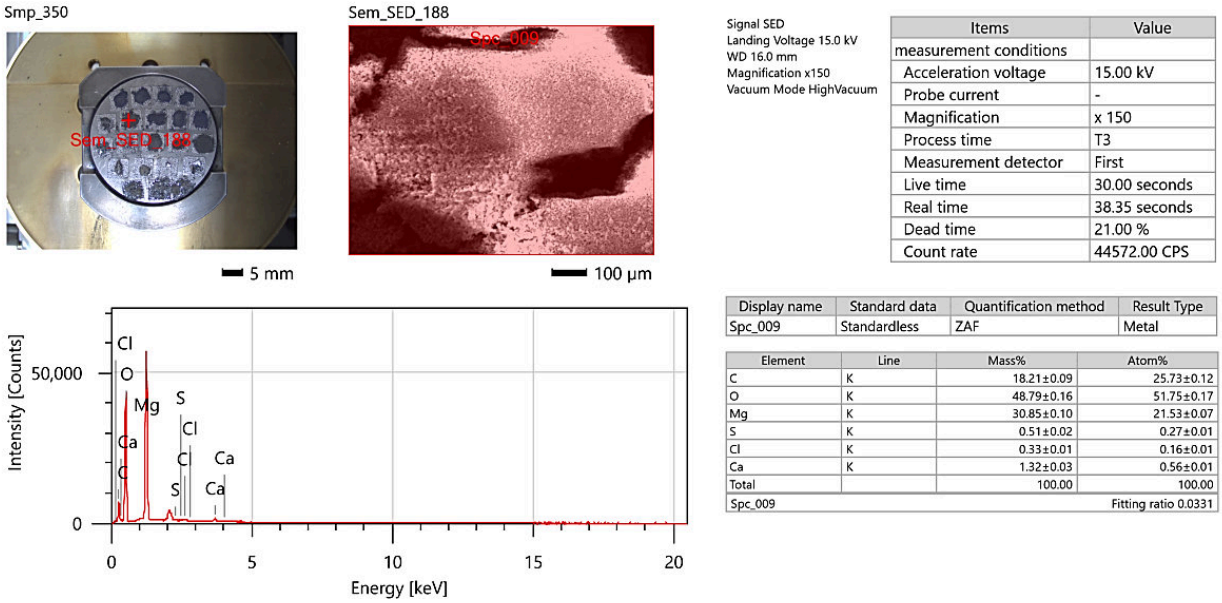
Рисунок 1. СЭМ-микрофотографии высушенного магнийсодержащего осадка (ускоряющее напряжение 3,0 кВ): а - ×500; б - ×750; в - ×1100; г - ×2700

Формирование агрегатов может происходить непосредственно в процессе осаждения, а также при фильтровании, промывке и последующей сушке. Подобное поведение мелких частиц отмечалось и при карбонатном осаждении магния в модельных растворах [8]. Для оценки фильтруемости осадка дополнительно необходимы сведения о влажности, распределении частиц по размерам и скорости разделения суспензии.

ЭДС-спектр получен при 15 кВ и увеличении ×150, тогда как морфологические микрофотографии на рисунке 1 зарегистрированы при 3 кВ. Согласно предоставленному спектру локального ЭДС-анализа (рис. 2), основными регистрируемыми элементами являются Mg, O и C. Результаты обработки приведены в таблице 2. Сумма округлённых массовых долей составляет 100,01 %, что обусловлено округлением. Небольшие количества Ca, S и Cl согласуются с наличием сопутствующих компонентов исходной рапы и возможным их удержанием в осадке.

Таблица 2. Локальный элементный состав высушенного осадка по данным ЭДС

Элемент	**Mg**	**O**	**C**	**Ca**	**S**	**Cl**
Массовая доля, %	30,85	48,79	18,21	1,32	0,51	0,33



Items	Value
measurement conditions	
Acceleration voltage	15.00 kV
Probe current	-
Magnification	x 150
Process time	T3
Measurement detector	First
Live time	30.00 seconds
Real time	38.35 seconds
Dead time	21.00 %
Count rate	44572.00 CPS

Display name	Standard data	Quantification method	Result Type
Spc_009	Standardless	ZAF	Metal

Element	Line	Mass%	Atom%
C	K	18.21±0.09	25.73±0.12
O	K	48.79±0.16	51.75±0.17
Mg	K	30.85±0.10	21.53±0.07
S	K	0.51±0.02	0.27±0.01
Cl	K	0.33±0.01	0.16±0.01
Ca	K	1.32±0.03	0.56±0.01
Total		100.00	100.00
Spc_009			Fitting ratio 0.0331

Рисунок 2. Результаты локального СЭМ-ЭДС-анализа магнийсодержащего осадка: расположение области анализа, микрофотография (×150), параметры регистрации при 15 кВ, энергодисперсионный спектр и результаты количественной обработки

Важным ограничением является невозможность однозначно установить формулу продукта по приведённым данным. Так, массовая доля Mg в идеализированном соединении $3MgCO_3 \cdot Mg(OH)_2 \cdot 3H_2O$ составляет около 26,6 %, а углерода - около 9,9 %, тогда как локальный ЭДС-анализ выявил соответственно 30,85 и 18,21 %. Несовпадение не является доказательством иной конкретной фазы: на результаты могли повлиять неоднородность образца, сопутствующие вещества, способ пробоподготовки и особенности определения лёгких элементов методом ЭДС. Следовательно, обозначение «магнезиальная альба» на данном этапе корректно рассматривать как предполагаемый технологический целевой продукт, а не как установленную структурную формулу исследованного осадка.

Для достоверной идентификации фаз требуется рентгенофазовый анализ (РФА), дополненный при необходимости ИК-спектроскопией и термогравиметрией. В работах по осаждению карбонатов магния показано, что даже сходные морфологические признаки могут соответствовать разным гидратным и аморфным состояниям [8-10]. Для расчёта степени демагнизации дополнительно необходимы количественный анализ Mg^{2+} в исходном растворе и фильтрате, масса и влажность осадка, его валовый химический состав и материальный баланс по магнию.

Сопоставление с зарубежными исследованиями позволяет определить практическую ценность работы как предварительной физико-химической характеристики осаждения магния из конкретной многокомпонентной природной рапы. Для перехода к заявлению о получении высокочистого товарного продукта следует экспериментально доказать фазовую однородность, показатели чистоты, воспроизводимый выход и выполнение технических требований к выбранной марке магниевого соединения [3-5].

Заключение

Для исследованной пробы караумбетской рапы установлены массовые доли MgSO4 1,44 %, MgCl2 7,82 %, NaCl 16,46 % и CaSO4 0,10 % при плотности 1,21 г/см³. Совокупный расчётный солевой состав охватывает 25,82 масс. % рапы. На основе условной массы рапы 100 г рассчитано 0,09409 моль Mg^{2+} и теоретическая потребность в безводном карбонате натрия 9,97 г. Полученная величина является расчётной и не характеризует фактическую конверсию или степень извлечения. При обработке рапы раствором Na2CO3 при 90 °C в течение 60 мин получен дисперсный магнийсодержащий осадок, частицы которого по данным СЭМ склонны к агломерации. Локальный ЭДС-анализ показал преобладание Mg, O и C при наличии небольшого количества Ca, S и Cl. Точный фазовый состав, чистота магнезиальной альбы и фактическая степень демагнизации представленными данными не установлены. Для научного обоснования технологических параметров необходимы РФА, термический и валовый химический анализ осадка, определение остаточного магния в фильтрате, а также серия опытов с изменением температуры, продолжительности и дозировки соды.

Список литературы

1. Бегдуллаев А.К., Реймов К.Д., Хужамбергенов Б.Е., Жугинисов Б.Б., Кошанова Б.Т., Эркаев А.У. Физико-химические исследования процесса обессульфачивания рапы с применением отходов производства соды // Universum: технические науки. – 2024. – № 5 (122). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/17529 (дата обращения: 09.11.2026).
2. Бобокулова О.С., Усманов И.И., Мирзакулов Х.Ч. Соли озер Караумбет и Барсакельмес – сырье для получения солей магния // Химия и химическая технология. – 2014. – № 1. – С. 11–16.
3. Bouaziz I., Takriff M.S., Atieh M.A. et al. Sustainable brine management: Unlocking magnesium and calcium for improved carbonation in the modified Solvay process // Desalination and Water Treatment. – 2024. – T. 319. – Art. 100526. – DOI: 10.1016/j.dwt.2024.100526.
4. Fontana D., Forte F., Pietrantonio M., Pucciarmati S., Marcoaldi C. Magnesium recovery from seawater desalination brines: a technical review // Environment, Development and Sustainability. – 2023. – T. 25. – P. 13733–13754. – DOI: 10.1007/s10668-022-02663-2.
5. Kasimu N.A., Gu J. Effect of sodium chloride on yield, purity, morphology and polymorphs of calcium or magnesium carbonate sequentially precipitated from brine solution // Desalination. – 2024. – T. 578. – Art. 117443. – DOI: 10.1016/j.desal.2024.117443.
6. Montes-Hernandez G. Magnesite formation from nesquehonite slurry at 90 °C using some soluble Mg salts: Eitelite as an atypical transient mineral phase // Chemical Engineering Science. – 2024. – T. 287. – Art. 119776. – DOI: 10.1016/j.ces.2024.119776.
7. Myung J., Choi W.Y., Oh S. et al. Impact of brine composition on the selective removal of Ca^{2+} and Mg^{2+} via carbonate formation // Chemical Engineering Journal. – 2025. – T. 507. – Art. 160537. – DOI: 10.1016/j.cej.2025.160537.

8. Ojeda Villegas S.D., Uribe Salas A. Elizondo Álvarez M.A. Characterization of solids obtained from calcium and magnesium precipitation by sodium carbonate addition // MRS Advances. – 2023. – T. 8. – P. 1408–1412. – DOI: 10.1557/s43580-023-00733-9.
9. Santos H.S., Nguyen H., Venâncio F., Ramteke D., Zevenhoven R., Kinnunen P. Mechanisms of Mg carbonates precipitation and implications for CO_2 capture and utilization/storage // Inorganic Chemistry Frontiers. – 2023. – T. 10. – P. 2507–2546. – DOI: 10.1039/D2QI02482A.
10. Santos H.S., Nguyen H., Illikainen S., Alzeer M.I. M., Cunha S., Kinnunen P. Effect of ammonium sulfate on the precipitation mechanism of Mg carbonates // Crystal Growth & Design. – 2024. – T. 24, № 17. – P. 7044–7058. – DOI: 10.1021/acs.cgd.4c00700.

References

1. Begdullaev A.K., Reimov K.D., Khuzhambergenov B.E., Zhuginisov B.B., Koshanova B.T., Erkaev A.U. [Physicochemical studies of the brine desulfation process using soda production waste] // Universum: tekhnicheskie nauki. – 2024. – No. 5 (122) [Электронный ресурс]. – URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/17529 (accessed: 09.11.2026). (In Russ.).
2. Bobokulova O.S., Usmanov I.I., Mirzakulov Kh. Ch. [Salts of Karaumbet and Barsakelmes lakes as raw materials for obtaining magnesium salts] // Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya. – 2014. – No. 1. – P. 11–16. (In Russ.).
3. Bouaziz I., Takriff M.S., Atieh M.A. et al. Sustainable brine management: Unlocking magnesium and calcium for improved carbonation in the modified Solvay process // Desalination and Water Treatment. – 2024. – Vol. 319. – Art. 100526. – DOI: 10.1016/j.dwt.2024.100526.
4. Fontana D., Forte F., Pietrantonio M., Pucciarmati S., Marcoaldi C. Magnesium recovery from seawater desalination brines: a technical review // Environment, Development and Sustainability. – 2023. – Vol. 25. – P. 13733–13754. – DOI: 10.1007/s10668-022-02663-2.
5. Kasimu N.A., Gu J. Effect of sodium chloride on yield, purity, morphology and polymorphs of calcium or magnesium carbonate sequentially precipitated from brine solution // Desalination. – 2024. – Vol. 578. – Art. 117443. – DOI: 10.1016/j.desal.2024.117443.
6. Montes-Hernandez G. Magnesite formation from nesquehonite slurry at 90 °C using some soluble Mg salts: Eitelite as an atypical transient mineral phase // Chemical Engineering Science. – 2024. – Vol. 287. – Art. 119776. – DOI: 10.1016/j.ces.2024.119776.
7. Myung J., Choi W.Y., Oh S. et al. Impact of brine composition on the selective removal of Ca^{2+} and Mg^{2+} via carbonate formation // Chemical Engineering Journal. – 2025. – Vol. 507. – Art. 160537. – DOI: 10.1016/j.cej.2025.160537.
8. Ojeda Villegas S.D., Uribe Salas A. Elizondo Álvarez M.A. Characterization of solids obtained from calcium and magnesium precipitation by sodium carbonate addition // MRS Advances. – 2023. – Vol. 8. – P. 1408–1412. – DOI: 10.1557/s43580-023-00733-9.

9. Santos H.S., Nguyen H., Venâncio F., Ramteke D., Zevenhoven R., Kinnunen P. Mechanisms of Mg carbonates precipitation and implications for CO_2 capture and utilization/storage // Inorganic Chemistry Frontiers. – 2023. – Vol. 10. – P. 2507–2546. – DOI: 10.1039/D2QI02482A.
10. Santos H.S., Nguyen H., Illikainen S., Alzeer M.I. M., Cunha S., Kinnunen P. Effect of ammonium sulfate on the precipitation mechanism of Mg carbonates // Crystal Growth & Design. – 2024. – Vol. 24, No. 17. – P. 7044–7058. – DOI: 10.1021/acs.cgd.4c00700.

Статья поступила в редакцию: 12.11.2026
Статья принята к публикации: 18.11.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 541.123.3+546.71

DOI: 10.32743/UniTech.2026.152.11.23761

Диаграмма растворимости системы $MNSO_4$–$MNCL_2$–H_2O

Исакова Ойгул Мадаминжоновна
докторант (DSc)
Наманганский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Наманган
Кучаров Байрам Хайриевич
гл. науч. сотр. лаборатории АКУС Институт общей и неорганической химии Академия наук Республики Узбекистан
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Тураев Зокиржон
проф.
Наманганский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Наманган
Улашова Нафиса Актам кизи
мл. науч. сотр. лаборатории
АКУС, Институт общей и неорганической химии Академия наук Республики Узбекистан
Республика Узбекистан, г. Ташкент

SOLUBILITY DIAGRAM OF THE $MnSO_4$–$MnCl_2$–H_2O SYSTEM

Isakova Oygul Madaminjonovna
DSc Doctoral Student
Namangan State Technical University
Uzbekistan, Namangan
Kucharov Bayram Khairievich
Chief Researcher
AKUS Laboratory
Institute of General and Inorganic Chemistry
Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan
Uzbekistan, Tashkent
Turaev Zokirjon
professor
Namangan State Technical University
Uzbekistan, Namangan
Ulashova Nafisa Aktam qizi
Junior Researcher
AKUS Laboratory Institute of General and Inorganic Chemistry
Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan
Uzbekistan, Tashkent

Библиографическое описание: Диаграмма растворимости системы $MnSO_4$–$MnCl_2$–H_2O // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Исакова О.М. [и др.]. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23761

Аннотация

Визуально-политермическим методом изучены фазовые равновесия в тройной системе $MnSO_4$–$MnCl_2$–H_2O в интервале температур от полного замерзания (−55,1 °C) до 20 °C. Исследование проведено по шести внутренним разрезам; на основе политерм растворимости бинарных систем и данных внутренних разрезов построена политермическая диаграмма растворимости системы. На диаграмме выделены поля кристаллизации льда, $MnSO_4 \cdot 7H_2O$, $MnSO_4 \cdot 5H_2O$, $MnSO_4 \cdot H_2O$, $MnCl_2 \cdot 6H_2O$ и $MnCl_2 \cdot 4H_2O$, установлены четыре тройные инвариантные точки, соответствующие совместной кристаллизации компонентов. Внутри полей кристаллизации нанесены изотермы растворимости в интервале от −50 до 20 °C, построены проекции политермических кривых на боковые стороны систем «сульфат марганца – вода» и «хлорид марганца – вода». Показано, что наибольшую область занимает поле кристаллизации хлорида марганца, а сульфат марганца оказывает высаливающее действие на хлорид марганца. В системе не образуются двойные соли и новые твёрдые фазы, она относится к простому эвтектическому типу. Фазовые области не перекрываются и последовательно сменяют друг друга при изменении состава, а равновесия определяются процессами гидратации, дегидратации и кристаллизации компонентов. Полученные данные могут быть использованы при разработке процессов кристаллизации и разделения соединений марганца.

Abstract

Phase equilibria in the ternary $MnSO_4$–$MnCl_2$–H_2O system were studied by the visual-polythermal method over the temperature range from complete freezing (−55.1 ^{0}C) to 20 ^{0}C. The study was carried out along six internal sections; the polythermal solubility diagram of the system was constructed from the solubility polytherms of the binary systems and the data of the internal sections. The diagram shows the crystallization fields of ice, $MnSO_4 \cdot 7H_2O$, $MnSO_4 \cdot 5H_2O$, $MnSO_4 \cdot H_2O$, $MnCl_2 \cdot 6H_2O$ and $MnCl_2 \cdot 4H_2O$, and four ternary invariant points corresponding to the joint crystallization of the components were established. Solubility isotherms from −50 to 20 °C were plotted inside the crystallization fields, and projections of the polythermal solubility curves onto the side faces of the manganese sulfate–water and manganese chloride–water systems were constructed. The crystallization field of manganese chloride occupies the largest area of the diagram, and manganese sulfate has a pronounced salting-out effect on manganese chloride. No double salts or new solid phases form in the system, which belongs to the simple eutectic type. The phase regions do not overlap and succeed one another as the composition changes, and the equilibria are governed by hydration, dehydration and crystallization of the components. The data obtained can be used in developing processes for the crystallization and separation of manganese compounds.

Ключевые слова: политермический метод, фазовые равновесия, диаграмма растворимости, система $MnSO_4$–$MnCl_2$–H_2O, гидраты марганца, линии ликвидуса, инвариантные точки, кристаллизация, эвтектические точки.

Keywords: polythermal method, phase equilibria, solubility diagram, MnSO4–MnCl2–H2O system, manganese hydrates, liquidus lines, invariant points, crystallization, eutectic points.

Введение

Соединения марганца широко применяются в химической промышленности, металлургии, производстве минеральных удобрений, а также в сельском хозяйстве в качестве микроэлементов. Марганец играет важную роль в физиологических процессах растений, участвуя в фотосинтезе, ферментативных и окислительно-восстановительных реакциях [1-2]. Сульфат и хлорид марганца являются хорошо растворимыми солями, способными образовывать устойчивые гидратированные формы в водных растворах. Их совместное присутствие характерно для природных и технологических систем, включая гидрометаллургические растворы и отходы химических производств [3].

Изучение фазовых равновесий в тройных водно-солевых системах имеет как фундаментальное, так и прикладное значение. Данные о растворимости солей могут служить основой для создания справочных материалов и разработки технологических процессов [4]. Солевые добавки способны изменять температуры кипения и замерзания растворов [5], а также вызывать образование новых жидких фаз в системах с неограниченной смешиваемостью [6]. Эти особенности лежат в основе методов разделения и очистки веществ, таких как солевая ректификация, экстракция и разделение азеотропных смесей. Кроме того, растворы солей переходных металлов широко применяются в смешанных и неводных растворителях в металлорганическом катализе.

Несмотря на значительное количество исследований, водно-солевые системы, содержащие соли переходных металлов, остаются недостаточно изученными по сравнению с бинарными и более простыми тройными системами. Фазовые равновесия в таких системах определяют условия кристаллизации, распределение компонентов между фазами и устойчивость гидратированных форм, что имеет важное значение для разработки технологий переработки и очистки растворов [7–9].

Одним из наиболее информативных методов исследования подобных систем является политермический анализ, позволяющий устанавливать температурные зависимости фазовых переходов, области кристаллизации и характер взаимодействия компонентов.

Несмотря на наличие данных по индивидуальным солям марганца, фазовые равновесия в системе $MnSO_4$–$MnCl_2$–H_2O изучены недостаточно, особенно в широком интервале температур [10-11]. В связи с этим настоящая работа направлена на получение новых экспериментальных данных по фазовым равновесиям данной системы.

Дополнительный интерес к изучению подобных систем обусловлен необходимостью расширения фундаментальных представлений о закономерностях фазовых равновесий в многокомпонентных растворах. Полученные данные могут быть использованы для прогнозирования поведения солевых систем при изменении температуры и состава, а также для совершенствования методов направленной кристаллизации и разделения компонентов [12-13].

Материалы и методы

Изучение диаграмм растворимости компонентов и фазовых равновесий в системе проводили визуально-политермическим методом. Сущность метода заключается в визуальном наблюдении температуры появления первых кристаллов при равномерном охлаждении, а также температуры исчезновения последних кристаллов при медленном нагревании при непрерывном перемешивании растворов.

В качестве экспериментального прибора использовали пробирку, закрытую пробкой, через которую проходили стеклянная или платиновая мешалка и термометр с ценой деления 0,1°С. Для обеспечения равномерного охлаждения пробирку помещали в наружную пробирку (муфту), находящуюся в охлаждающей смеси. Нагрев также осуществляли через муфту. Охлаждение проводили в сосудах Дьюара с использованием жидкого азота или льда.

Состав и температуры кристаллизации узловых инвариантных точек, а также характер изменения линий насыщения двух сосуществующих твёрдых фаз определяли путём построения проекций политермических кривых растворимости на соответствующие боковые стороны системы. Составы, соответствующие изотермам растворимости, определяли методом интерполяции данных, полученных при исследовании политермических разрезов.

Результаты и их обсуждение

Нами проведено исследование растворимости в данной системе визуально-политермическим методом [14] в интервале температур от полного замерзания (−55,1 °С) до 20 °С (рис. 1).

Растворимость в системе $MnSO_4$–$MnCl_2$–H_2O изучена с использованием шести внутренних разрезов (рис. 1). На основе политерм растворимости бинарных систем и данных внутренних разрезов построена политермическая диаграмма растворимости системы $MnSO_4$-$MnCl_2$-H_2O. На диаграмме выделены поля кристаллизации льда, $MnSO_4 \cdot 7H_2O$, $MnSO_4 \cdot 5H_2O$, $MnSO_4 \cdot H_2O$, $MnCl_2 \cdot 6H_2O$ и $MnCl_2 \cdot 4H_2O$. Установлены четыре тройные инвариантные точки, соответствующие совместной кристаллизации компонентов системы (табл.).

На политермической диаграмме внутри полей кристаллизации нанесены изотермы растворимости в интервале температур от -50 до 20 °С. Построены проекции политермических кривых растворимости на боковые стороны систем «сульфат марганца - вода» и «хлорид марганца - вода», отражающие характер изменения поверхности кристаллизации (рис. 2).

Как видно из полученных данных, в исследованном температурном интервале в системе не образуются новые твёрдые фазы. Система относится к простому эвтектическому типу. Наибольшую область на диаграмме занимает поле кристаллизации хлорида марганца, тогда как поле кристаллизации сульфата марганца значительно меньше. Благодаря высокой растворимости компонентов в данной системе сульфат марганца оказывает выраженное высаливающее действие на хлорид марганца. В результате с увеличением концентрации сульфата марганца растворимость хлорида марганца уменьшается, что особенно заметно при высоких концентрациях сульфата марганца.

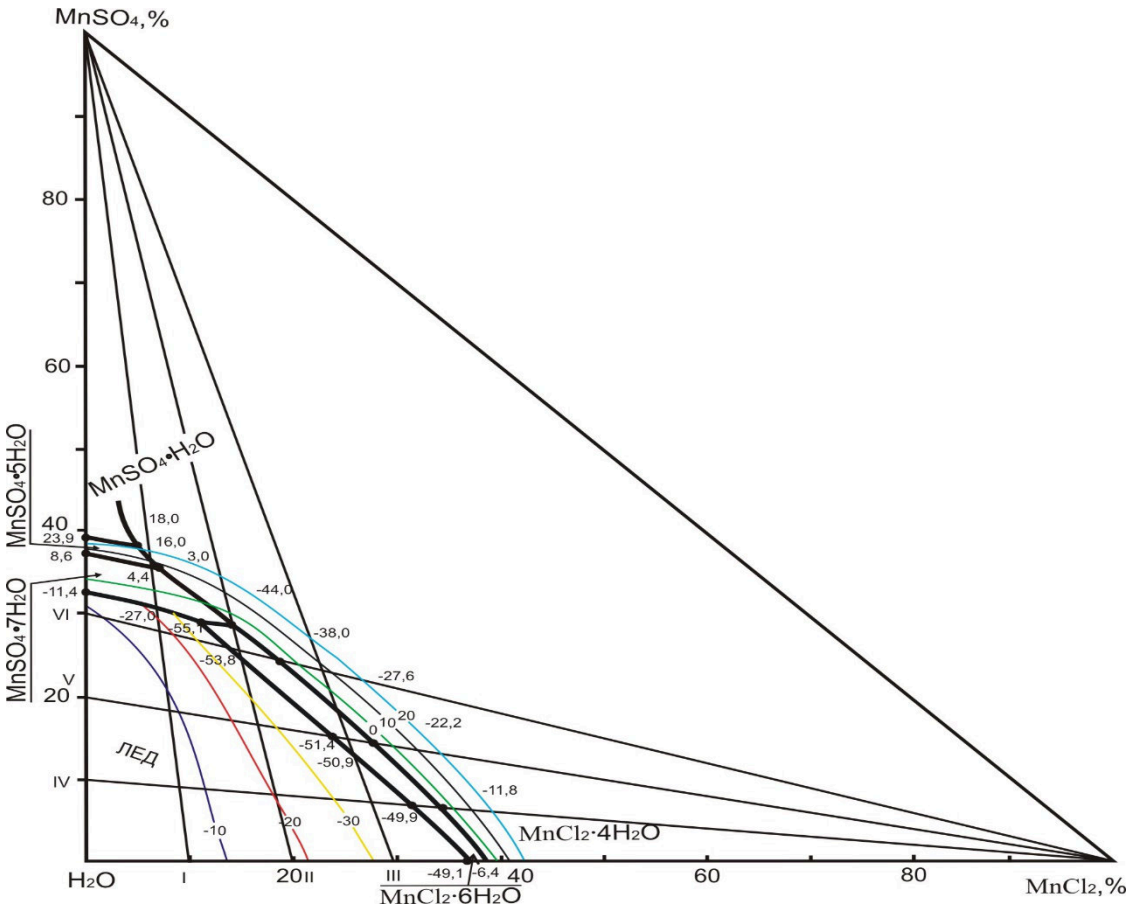


Рисунок 1. Политермическая диаграмма системы $MnSO_4$-$MnCl_2$-H_2O

Показано, что система относится к типу простых водно-солевых систем без образования двойных солей. Фазовые равновесия определяются процессами гидратации, дегидратации и кристаллизации компонентов.

С увеличением концентрации $MnCl_2$ происходит: смещение линий ликвидуса в область более высоких температур, уменьшение области существования жидкой фазы (раствора), стабилизация гидратированных форм солей.

Таблица 1. Двойные и тройные узловые точки системы $MnSO_4$–$MnCl_2$–H_2O

Состав жидкой фазы, %			**Температура кристализации, ^{0}C**	**Твердая фаза**
$MnSO_4$	**$MnCl_2$**	**H_2O**		
-	38,5	61,5	-6,4	$MnCl_{2*}6H_2O$+$MnCl_{2*}4H_2O$
6,4	34,4	59,2	-11,8	$MnCl_{2*}6H_2O$+$MnCl_{2*}4H_2O$
14,3	27,4	58,3	-22,2	$MnCl_{2*}6H_2O$+$MnCl_{2*}4H_2O$
18,8	24,2	57,0	-27,6	$MnCl_{2*}6H_2O$+$MnCl_{2*}4H_2O$
24,3	18,2	57,5	-38,0	$MnCl_{2*}6H_2O$+$MnCl_{2*}4H_2O$
28,4	14,0	57,6	-44,0	$MnCl_{2*}6H_2O$+$MnCl_{2*}4H_2O$+$MnSO_{4*}7H_2O$
-	37,3	62,7	-49,1	Лед+$MnCl_{2*}6H_2O$
6,6	32,0	61,4	-49,9	Лед+$MnCl_{2*}6H_2O$
12,6	26,4	61,0	-50,9	Лед+$MnCl_{2*}6H_2O$
15,2	23,6	61,2	-51,4	Лед+$MnCl_{2*}6H_2O$

Состав жидкой фазы, %			Температура кристализации, ^{0}C	Твердая фаза
$MnSO_4$	$MnCl_2$	H_2O		
24,2	14,8	61,0	-53,8	Лед+$MnCl_{2*}6H_2O$
29,0	11,2	59,8	-55,1	Лед+ $MnSO_{4*}7H_2O$+$MnCl_{2*}6H_2O$
32,2	-	67,8	-11,4	Лед+ $MnSO_{4*}7H_2O$
31,9	6,4	61,7	-27,0	Лед+ $MnSO_{4*}7H_2O$
32,4	6,2	61,4	+8,6	$MnSO_{4*}7H_2O$+$MnSO_{4*}5H_2O$
35,6	6,0	58,4	+4,4	$MnSO_{4*}7H_2O$+$MnSO_{4*}5H_2O$
35,2	8,0	56,8	+3,0	$MnSO_{4*}7H_2O$+ $MnSO_{4*}5H_2O$+$MnCl_{2*}4H_2O$
37,0	5,8	57,2	+16,0	$MnSO_{4*}5H_2O$+$MnSO_{4*}H_2O$+$MnCl_{2*}4H_2O$
39,0	-	61,0	23,9	$MnSO_{4*}5H_2O$+$MnSO_{4*}H_2O$

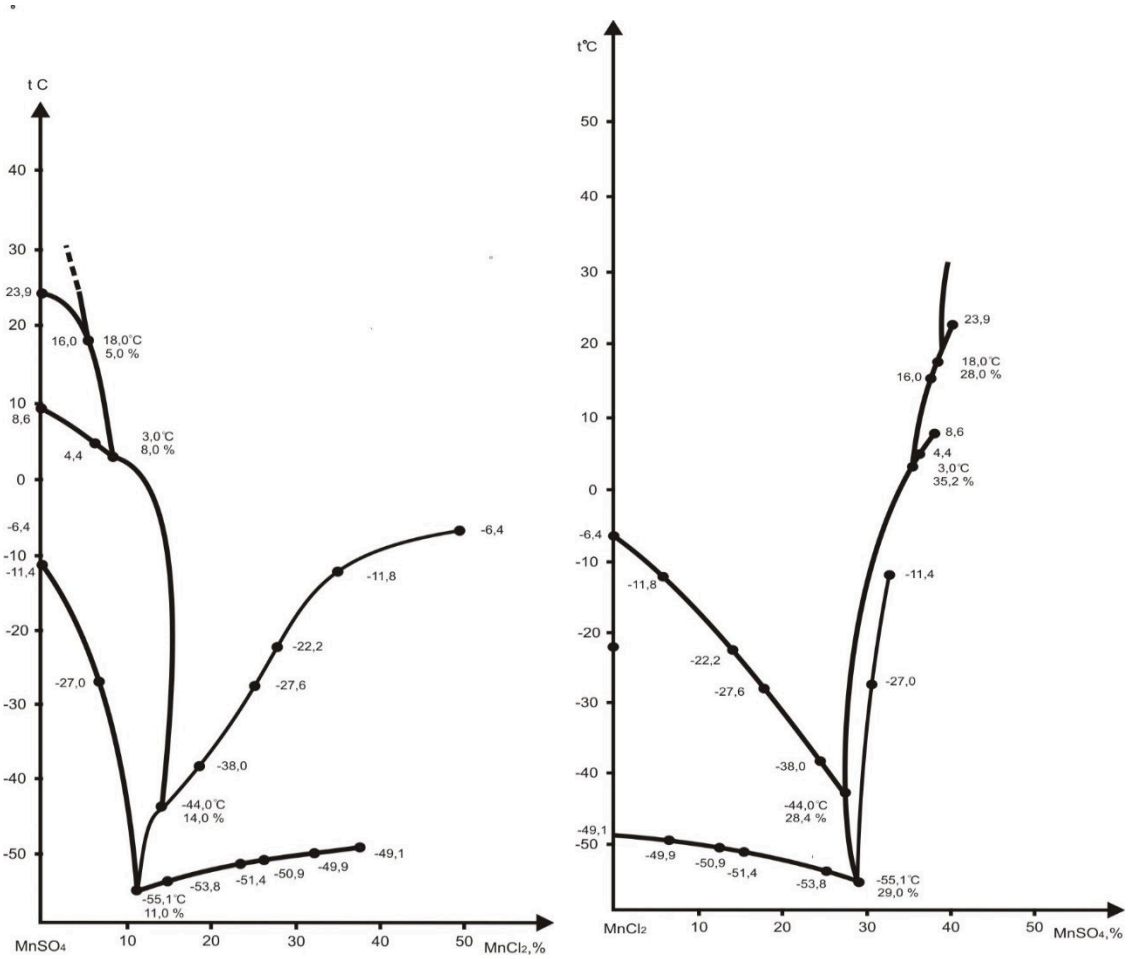


Рисунок 2. Проекции диаграммы системы $MnSO_4$–$MnCl_2$–H_2O

Проекции диаграммы подтверждают, что фазовые области не перекрываются и последовательно сменяют друг друга при изменении состава системы, что свидетельствует об отсутствии образования двойных солей и сложных соединений.

Заключение

Таким образом, В результате политермического исследования системы $MnSO_4$–$MnCl_2$–H_2O установлены закономерности фазовых равновесий в широком интервале температур и концентраций. Показано, что в системе наблюдается поля кристаллизации льда и гидратированных форм солей марганца. Установлено, что с увеличением концентрации $MnCl_2$ наблюдается повышение температуры кристаллизации воды, смещение линий ликвидуса и уменьшение области существования жидкой фазы. Выявлено, что в системе не образуются новые химические соединения, а фазовые равновесия определяются процессами гидратации и кристаллизации компонентов. Система относится к типу простых водно-солевых систем. Построенная политермическая диаграмма и её проекции позволяют описать распределение фаз и могут быть использованы при разработке технологических процессов кристаллизации и разделения соединений марганца. Полученные результаты расширяют представления о фазовом поведении водно-солевых систем с участием ионов Mn^{2+}.

Список литературы

1. Жуйков Д.В. Сера и микроэлементы в агроценозах (обзор) // Земледелие и растениеводство. – 2020. – № 11. – DOI: 10.24411/0235-2451-2020-11105.
2. Литвинова Т.Н., Выскубова Н.К., Ненашева Л.В. Биогенные элементы. Комплексные соединения: учеб. пособие для студентов мед. вузов. – Ростов-на. – Дону: Феникс, 2009. – 282 с.
3. Теория и технология получения цветных металлов электролизом: учеб.-метод. пособие / М-во науки и высшего образования Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2022.
4. Новый справочник химика и технолога. Химическое равновесие. Свойства растворов. – СПб.: Мир и семья, 2002. – 998 с.
5. Чепурина З.В. Влияние солей на фазовое поведение тройных жидкостных систем с замкнутой областью расслоения: дис. … канд. хим. наук. – Саратов, 2015.
6. Szymańska-Cybulska J., Kamieńska-Piotrowicz E. Solvation of cobalt(II) ion in N,N-dimethylformamide–methanol mixed solvent: calorimetry and VIS spectroscopy studies // Journal of Solution Chemistry. – 2006. – T. 35, № 12. – P. 1631–1643. – DOI: 10.1007/s10953-006-9092-3.
7. Сергеева А.В., Кирюхин А.В., Вахромеев А.Г. и др. Условия кристаллизации хлоридов при скважинной эксплуатации предельно насыщенных литиеносных рассолов на юге Сибирской платформы // Записки Горного института. – 2025. – Т. 276, № 2. – С. 89–106.
8. Плотникова С.Е., Горбунова Е.М., Нифталиев С.И. и др. Исследование фазовых равновесий в водно-солевых системах, содержащих компоненты молочной сыворотки // Вестник ВГУИТ. – 2023. – Т. 85, № 4. – С. 139–144. – DOI: 10.20914/2310-1202-2023-4-139-144.

9. Горбунов А.О. Равновесие раствор – твердая фаза в тройных водно-органических системах, содержащих соли переходных металлов: дис. … канд. хим. наук: 02.00.01. – Санкт-Петербург, 2017.
10. Солиев Л. Фазовые равновесия в нонвариантных точках системы Na, K, Mg, Ca // SO_4, Cl – H_2O при 50 °C // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. – 2009. – Т. 52, № 8. – С. 613–618.
11. Оруджлу Э.Н., Алиев З.С., Джафаров Я.И. и др. Термодинамическое исследование теллуридов марганца методом электродвижущих сил // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2021. – Т. 23, № 2. – С. 273–281. – DOI: 10.17308/kcmf. 2021.23/3438.
12. Солиев Л., Мусоджонова Д. Исследование фазовых равновесий в системе Na, K // SO_4, F – H_2O при 0 и 25 °C методом трансляции // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. – 2007. – Т. 50, № 5. – С. 436–441.
13. Грызлова Е.С., Козырева Н.А. Моделирование конверсионных химических процессов в многокомпонентных взаимных солевых системах // Успехи химии. – 2004. – Т. 73, № 10. – С. 1088–1117.
14. Якубов Ш.Ш., Обиджонов Д.О., Адилова М.Ш. и др. Исследование растворимости компонентов в водной системе из хлорэтилфосфонатов, дигидрофосфата, сульфата аммония и трикарбамидохлората натрия с целью разработки комплекснодействующего дефолианта // Журнал неорганической химии. – 2024. – Т. 69, № 1. – С. 92–98.

References

1. Zhuikov D.V. Sulfur and Microelements in Agroecosystems (Review) // Agriculture and Crop Production. – 2020. – No. 11. – DOI: 10.24411/0235-2451-2020-11105.
2. Litvinova T.N., Vyskubova N.K., Nenasheva L.V. Biogenic Elements. Complex Compounds: A Textbook for Medical University Students. – Rostov-on. – Don: Phoenix, 2009. – 282 P.
3. Theory and Technology of Obtaining Non-Ferrous Metals by Electrolysis: Teaching and Methodological Guide. Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin. – Yekaterinburg: Ural University Publishing House, 2022.
4. New Handbook of Chemist and Technologist. Chemical Equilibrium. Properties of Solutions. – St. Petersburg: Mir i Semya, 2002. – 998 P.
5. Chepurina Z.V. Influence of Salts on the Phase Behavior of Ternary Liquid Systems with a Closed Miscibility Gap. PhD Dissertation. – Saratov. – 2015.
6. Kamienska-Piotrowicz E. Solvation of Cobalt(II) Ion in N,N-Dimethylformamide–Methanol Mixed Solvent: Calorimetry and VIS Spectroscopy Studies // Journal of Solution Chemistry. – 2006. – Vol. 35. – P. 1631–1643.

7. Sergeeva A.V., Kiryukhin A.V., Vakhromeev A.G., Korotkov S.B., Danilova M.A., Kartasheva E.V., Kuzmina A.A., Nazarova M.A. Conditions for the Crystallization of Chlorides during the Well Operation of Highly Saturated Lithium-Bearing Brines in the South of the Siberian Platform // Journal of Mining Institute. – 2007. – P. 89–106.
8. Plotnikova S.E., Gorbunova E.M., Niftaliev S.I., Bocharova L.V., Luchko A.M. Investigation of Phase Equilibria in Aqueous-Salt Systems Containing Whey Components // Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies. – 2023. – Vol. 85, No. 4. – P. 139–144. – DOI: 10.20914/2310-1202-2023-4-139-144.
9. Gorbunov A.O. Solid–Liquid Equilibrium in Ternary Aqueous-Organic Systems Containing Transition Metal Salts. PhD Dissertation in Chemical Sciences, Specialty 02.00.01 – Inorganic Chemistry. – St. Petersburg. – 2017.
10. Soliev L. Phase Equilibria at Invariant Points of the Na, K, Mg, Ca // SO_4, Cl–H_2O System at 50 °C // Reports of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan. – 2009. – Vol. 52, No. 8. – P. 613–618.
11. Orujlu E.N., Aliyev Z.S., Jafarov Y.I., Akhmedov E.I., Babanly M.B. Thermodynamic Investigation of Manganese Tellurides by the Electromotive Force Method // Condensed Matter and Interphases. – 2021. – Vol. 23. – P. 273–281. – DOI: 10.17308/kcmf.2021.23/3438.
12. Soliev L., Musojonova D. Investigation of Phase Equilibria in the Na,K // SO_4,F–H_2O System at 0 and 25 °C by the Translation Method // Reports of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan. – 2007. – Vol. 50, No. 5. – P. 436–441.
13. Gryzlova E.S., Kozyreva N.A. Modeling of Conversion Chemical Processes in Multicomponent Reciprocal Salt Systems // Russian Journal of Inorganic Chemistry. – 2004. – Vol. 73, No. 10. – P. 1088–1117.
14. Yakubov Sh.Sh., Obidzhonov D.O., Adilova M.Sh., Shukurov Zh.S., Kucharov B.Kh., Zakirov B.S. Investigation of the Solubility of Components in an Aqueous System Containing Chloroethylphosphonates, Ammonium Dihydrogen Phosphate, Ammonium Sulfate, and Sodium Tricarbamidochlorate for the Development of a Complex-Action Defoliant // Russian Journal of Inorganic Chemistry. – 2024. – Vol. 69, No. 1. – P. 92–98.

Статья поступила в редакцию: 15.10.2026
Статья принята к публикации: 21.10.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 665.3:662.756

DOI: 10.32743/UniTech.2026.152.11.23599

Оценка качества отработанного подсолнечного масла как потенциального сырья для производства биодизеля

Исаматова Джамиля Нигматуллаевна
д-р филос. техн. наук (PhD), начальник отдела контроля за качеством образования Филиала Российского государственного университета нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина в городе Ташкенте
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: jamilyechka@mail.ru

Исмаилов Ойбек Юлибаевич
д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник Института общей и неорганической химии Академии наук Республики Узбекистан
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: ismoilovnmpi@mail.ru

Assessment of the quality of recycled sunflower oil as potential raw material for biodiesel production

Isamatova Djamila
doctor of Philosophy in Technical Sciences (PhD)
Head of the Department of Education Quality Control Branch of Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) in Tashkent Tashkent
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Ismailov Oybek
doctor of Technical Sciences, Leading Researcher
Institute of General and Inorganic Chemistry Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

В работе исследованы физико-химические характеристики и жирнокислотный состав отработанного подсолнечного масла, образующегося в процессе приготовления пищи, жарки рыбы и эксплуатации фритюрницы. Цель исследования заключалась в сравнительной оценке качества отработанного масла в зависимости от условий его использования и количества циклов повторного нагревания, а также в определении перспектив его применения в качестве сырья для производства биодизельного топлива. Проведено сопоставление трех образцов по

Библиографическое описание: Исаматова Д.Н., Исмаилов О.Ю. Оценка качества отработанного подсолнечного масла как потенциального сырья для производства биодизеля // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23599

результатам газохроматографического анализа жирнокислотного состава, определения кислотного и пероксидного чисел, а также содержания влаги. Особое внимание уделено изменениям исследуемых показателей при многократном использовании масла. Установлено, что во всех образцах сохраняется значительная доля ненасыщенных жирных кислот, преимущественно линолевой и олеиновой, что свидетельствует о сохранении потенциала данного сырья для получения биодизеля. Вместе с тем выявлены изменения физико-химических показателей, обусловленные воздействием высоких температур, контактом с пищевыми продуктами и повторными циклами нагревания. По сравнению со свежим маслом отработанные образцы характеризуются повышенными значениями пероксидного числа и содержания влаги, тогда как при увеличении количества циклов повторного нагревания наблюдается рост кислотного числа. Наиболее выраженные изменения установлены у образца масла, использованного для жарки рыбы. Полученные результаты подтверждают необходимость предварительной подготовки отработанного масла перед его переработкой в биодизель, включающей удаление механических примесей, сушку и, при необходимости, дополнительную химическую обработку с учетом кислотности сырья. Практическая значимость исследования заключается в обосновании возможности рационального использования отработанных растительных масел и снижении экологической нагрузки за счет их вовлечения во вторичный производственный цикл.

Abstract

This study investigates the physicochemical properties and fatty acid composition of waste sunflower oil generated during food preparation, fish frying, and deep-frying operations. The aim of the study was to comparatively evaluate the quality of waste oil depending on the conditions of use and the number of repeated heating cycles, as well as to assess its potential for use as a feedstock for biodiesel production. Three oil samples were compared based on the results of gas chromatographic analysis of their fatty acid composition, acid value, peroxide value, and moisture content. Particular attention was paid to changes in the investigated parameters during repeated oil use. The results showed that all samples retained a substantial proportion of unsaturated fatty acids, predominantly linoleic and oleic acids, indicating that the oil remains a potentially suitable feedstock for biodiesel production. However, changes in physicochemical parameters were observed as a result of exposure to high temperatures, contact with food products, and repeated heating cycles. Compared with fresh oil, the waste oil samples exhibited higher peroxide values and moisture content, while the acid value increased with the number of repeated heating cycles. The most pronounced changes were identified in the oil sample used for fish frying. The findings confirm the need for pretreatment of waste oil before its conversion into biodiesel. This treatment should include the removal of mechanical impurities, drying, and, where necessary, additional chemical processing depending on the acidity of the feedstock. The practical significance of this study lies in substantiating the potential for the rational utilization of waste vegetable oils and reducing environmental impacts by incorporating them into a secondary production cycle.

Ключевые слова: отработанное подсолнечное масло, биодизель, жирнокислотный состав, газовая хроматография, кислотное число, пероксидное число, предварительная обработка.

Keywords: waste sunflower oil, biodiesel, fatty acid composition, gas chromatography, acid value, peroxide value, pretreatment.

Введение

Рост потребления растительных масел сопровождается образованием значительного количества отработанного масла в бытовом секторе и предприятиях общественного питания. При ненадлежащем обращении такие отходы могут загрязнять почву и водные ресурсы. Их сбор и переработка в жидкое биотопливо позволяют рассматривать отработанное масло как вторичное сырье и расширять возможности рационального использования ресурсов [2, 5, 6, 8].

Подсолнечное масло выбрано в качестве объекта исследования с учетом его широкого применения в приготовлении пищи и доступности отработанного сырья. По данным, приведенным в исходных материалах, в январе–августе 2025 года Узбекистан импортировал 163,4 тыс. т подсолнечного масла, а крупные предприятия произвели 83,5 тыс. т; ориентировочное годовое потребление оценивалось примерно в 350 тыс. т [7]. Потенциальный объем собираемого отработанного масла на уровне 50–53 тыс. т в год [1]. Эти оценки указывают на актуальность разработки технологий его переработки.

Цель и задачи исследования

Целью работы являются оценка физико-химические характеристики и жирнокислотный состав отработанного подсолнечного масла после использования в различных процессах приготовления пищи и определить особенности его предварительной подготовки к переработке в биодизель.

Для достижения цели исследованы три образца: масло после приготовления пищи (ИКМ-1); масло после жарки рыбы (ИКМ-2); масло после использования во фритюрнице (ИКМ-3). Определялись состав жирных кислот методом газовой хроматографии, кислотное и пероксидное числа, содержание влаги, а также динамика указанных показателей в течение пяти циклов повторного использования. Для сопоставления результатов использовались показатели свежего подсолнечного масла, приведенные в исходных материалах.

Жирнокислотный состав оценивали по данным газохроматографического анализа. Сопоставлялись число зарегистрированных пиков, время удерживания и относительное содержание основных компонентов. Физико-химическое состояние образцов оценивали по кислотному числу (мг KOH/г), пероксидному числу (ммоль O_2/кг) и содержанию влаги (%) [3]. Для изучения влияния повторного нагревания показатели анализировали от первого до пятого цикла использования.

Жирнокислотный состав трёх образцов отработанного подсолнечного масла оценивали по результатам газохроматографического анализа. Согласно аналитическим отчётам, использовался метод GOST 31754-2012 trans 100M, объём вводимой пробы составлял 1 мкл, а регистрация сигналов проводилась с использованием пламенно-ионизационного детектора (FID). Сопоставляли количество зарегистрированных пиков, время удерживания и относительное содержание компонентов, указанных в исходных аналитических материалах.

Материалы и методы исследования

Объектами исследования являлись три образца отработанного подсолнечного масла: после приготовления пищи (ИКМ-1), жарки рыбы (ИКМ-2) и использования во фритюрнице (ИКМ-3). Жирнокислотный состав образцов исследовали методом газовой хроматографии согласно методу GOST 31754-2012 trans 100M. Объём вводимой пробы составлял 1 мкл, регистрация хроматографических сигналов осуществлялась с использованием пламенно-ионизационного детектора (FID). При анализе сопоставляли количество зарегистрированных пиков, время удерживания и относительное содержание основных жирных кислот. Физико-химические характеристики масла оценивали по кислотному числу (мг KOH/г), пероксидному числу (ммоль O_2/кг) и содержанию влаги (%).

Для оценки влияния повторного использования масла исследовали изменение указанных показателей в течение пяти циклов нагревания. Полученные данные сравнивали между образцами, определяя динамику кислотного и пероксидного чисел, а также содержания влаги в зависимости от условий эксплуатации масла. Отдельно оценивали степень увеличения кислотного числа между первым и пятым циклами повторного использования. Результаты сравнительного анализа использовали для определения особенностей изменения качества отработанного масла и обоснования необходимости его предварительной подготовки к производству биодизеля, включающей фильтрацию, сушку и, при необходимости, дополнительную химическую обработку перед трансэтерификацией.

Результаты и обсуждение

Жирнокислотный состав образцов

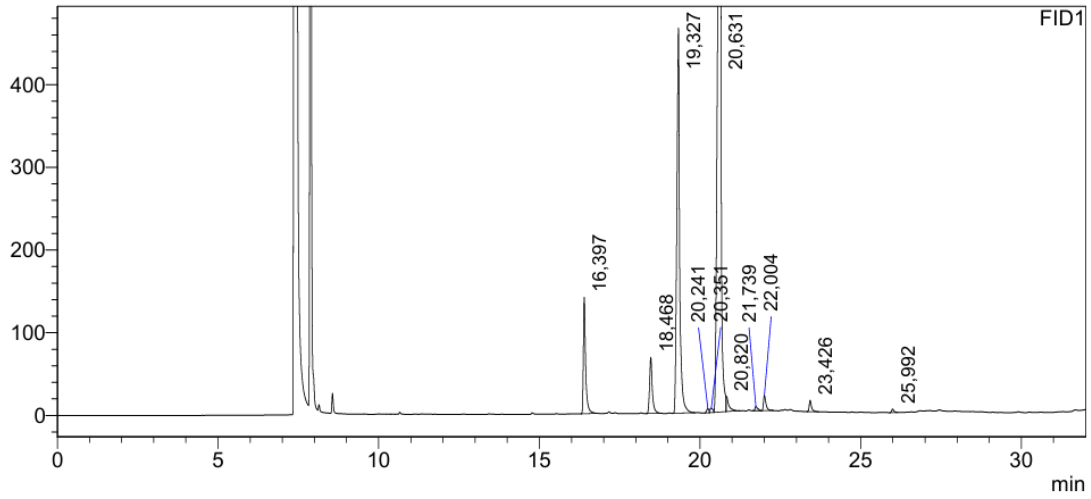


Рисунок 1. Газовая хроматограмма масла ИКМ-1

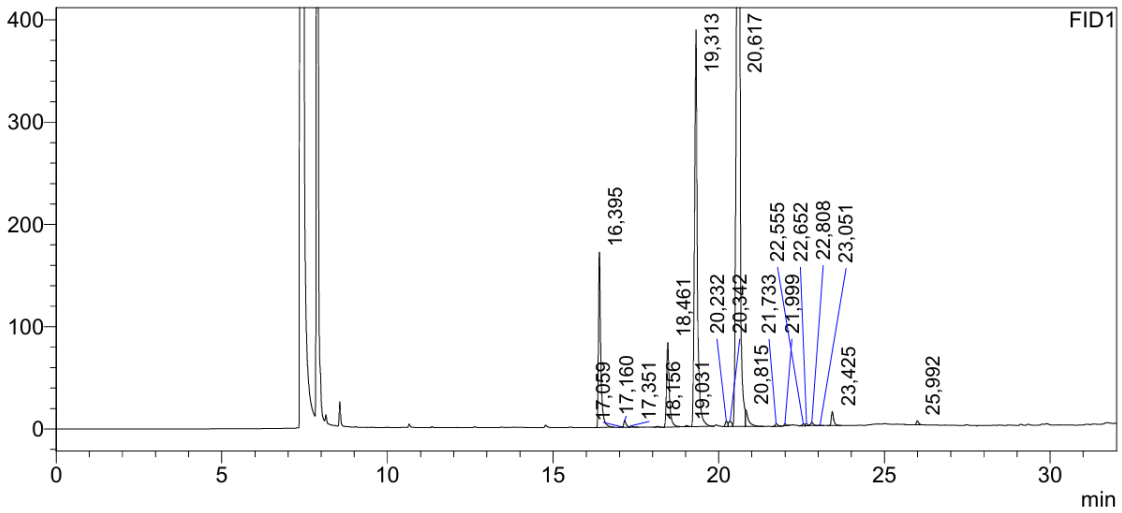


Рисунок 2. Газовая хроматограмма масла ИКМ-2

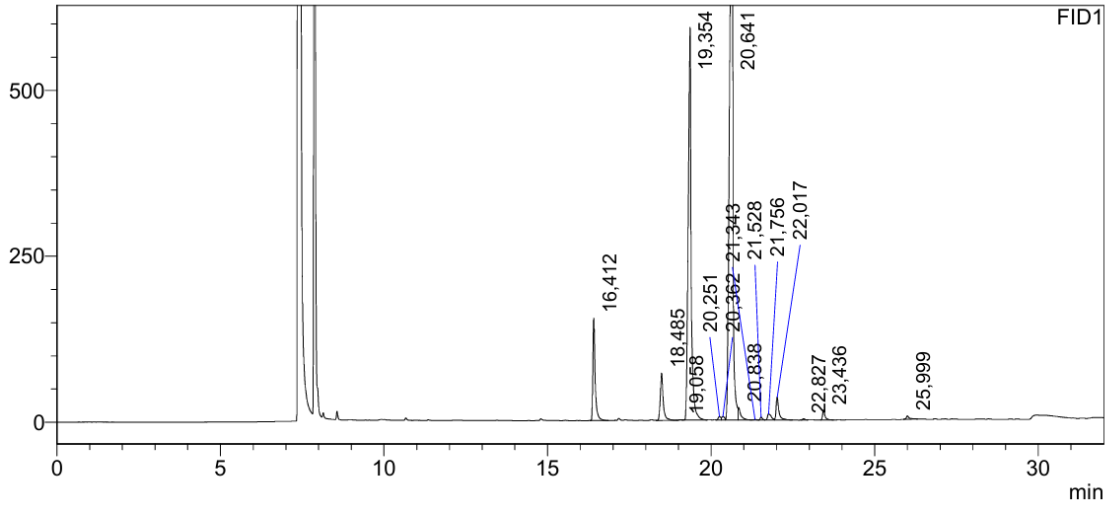


Рисунок 3. Газовая хроматограмма масла ИКМ-3

В хроматограмме образца ИКМ-1 зарегистрировано 11 пиков, ИКМ-2 — 20 пиков, ИКМ-3 — 15 пиков. Для всех образцов характерны два наиболее выраженных сигнала с временем удерживания около 19,3 и 20,6 мин. Их относительные доли различались в зависимости от условий использования масла.

Таблица 1. Сравнительная оценка газохроматографических показателей проб отработанного масла

Показатель	ИКМ-1	ИКМ-2	ИКМ-3
Количество пиков	11	20	15
Диапазон времени удерживания, мин	16,397–25,992	16,395–25,992	16,412–25,999
Пик около 19,3 мин, %	24,581	22,066	29,528
Пик около 20,6 мин, %	62,741	62,000	56,423
Суммарная доля четырех основных пиков, %	96,662	96,586	95,361

Согласно идентификации, приведенной в исходных материалах, основными жирными кислотами являлись линолевая и олеиновая. В ИКМ-1 содержание линолевой кислоты составляло 62,741 %, олеиновой — 25,581 %; в ИКМ-2 — соответственно 62,000 и 22,066 %; в ИКМ-3 — 56,423 и 29,528 %. Таким образом, максимальная доля линолевой кислоты отмечена в ИКМ-1, минимальная в ИКМ-3. Для ИКМ-3 по сравнению с ИКМ-1 доля линолевой кислоты была ниже на 6,318 процентного пункта, а олеиновой — выше на 3,947 процентного пункта.

Среди насыщенных жирных кислот наибольшие значения пальмитиновой (7,927 %) и стеариновой (4,593 %) кислот отмечены в ИКМ-2. Содержание α-линоленовой кислоты составляло 0,860 % в ИКМ-1, 0,079 % в ИКМ-2 и 1,620 % в ИКМ-3. Суммарная доля олеиновой, линолевой и α-линоленовой кислот равнялась 89,182; 84,145 и 87,571 % соответственно. Следовательно, несмотря на различия, во всех образцах сохранялась значительная доля ненасыщенных жирных кислот, представляющих интерес для синтеза биодизеля.

Таблица 2. Основные физико-химические показатели образцов масла ИКМ

Показатель	ИКМ-1	ИКМ-2	ИКМ-3
Кислотное число, мг KOH/г	0,48	1,42	0,59
Пероксидное число, ммоль O_2/кг	32,23	168,6	24,06
Влага, %	0,60	0,92	0,74

Кислотное число изменялось от 0,48 до 1,42 мг KOH/г. Наименьшее значение наблюдалось у ИКМ-1, наибольшее у ИКМ-2. Пероксидное число также было максимальным у ИКМ-2 и составляло 168,6 ммоль O_2/кг, тогда как для ИКМ-1 и ИКМ-3 оно равнялось 32,23 и 24,06 ммоль O_2/кг соответственно. Содержание влаги находилось в диапазоне 0,60–0,92 %, причем наибольшее значение снова зарегистрировано для ИКМ-2.

Сопоставление показателей показывает, что масло после жарки рыбы характеризовалось наиболее выраженными изменениями по кислотному и пероксидному числам и содержанию влаги. Это указывает на необходимость более тщательной предварительной подготовки ИКМ-2 перед использованием в процессе получения биодизеля. При этом повышенное пероксидное число свидетельствует о протекании окислительных процессов.

При увеличении числа циклов повторного использования кислотное число всех трех образцов возрастало. Между первым и пятым циклами оно увеличилось в ИКМ-1 с 0,480 до 0,800 мг KOH/г (на 66,7 %), в ИКМ-2 — с 0,820 до 1,389 мг KOH/г (на 69,4 %), в ИКМ-3 — с 0,590 до 0,985 мг KOH/г (на 66,9 %). Увеличение кислотного числа согласуется с накоплением свободных жирных кислот при гидролитических изменениях триацилглицеридов в процессе повторного нагревания.

Таблица 3. Динамика изменения перекисного числа образцов отработанного масла ИКМ в зависимости от цикла повторного использования

Образец	Пероксидное число		Динамика
	Первый цикл	Пятый цикл	
ИКМ-1	32,23	58,97	Рост до 58,97
ИКМ-2	96,60	77,91	Максимум 138,30 на 3-м цикле; 71,91 на 4-м
ИКМ-3	24,06	56,57	Рост до 56,57

Динамика пероксидного числа различалась между образцами. В ИКМ-1 показатель увеличился с 32,23 до 58,97 ммоль O_2/кг, в ИКМ-3 — с 24,06 до 56,57 ммоль O_2/кг. В ИКМ-2 он вырос с 96,60 ммоль O_2/кг в первом цикле до 119,00 во втором и достиг максимума 138,30 в третьем цикле, после чего снизился до 71,91 в четвертом и составил 77,91 ммоль O_2/кг в пятом. Снижение показателя на поздних этапах не обязательно означает прекращение окисления: оно может быть связано с разложением первичных гидропероксидов и образованием вторичных продуктов окисления.

В отличие от кислотного числа, содержание влаги не демонстрировало устойчивой однонаправленной динамики. Оно зависело от условий использования, нагрева и испарения воды. В целом значения влажности всех образцов превышали ориентир для свежего масла, указанный в исходных материалах (не более 0,10 %). Это подтверждает необходимость стадии сушки перед трансэтерификацией.

Оценка образцов по совокупности характеристик показывает, что жирнокислотная основа, необходимая для получения биодизеля, сохраняется во всех трех образцах. Содержание олеиновой кислоты находится в пределах 22,066–29,528 %, линолевой 56,423–62,741 %. Вместе с тем кислотное число, пероксидное число и влажность указывают на то, что отработанное масло нельзя рассматривать как полностью подготовленное сырье без предварительной обработки.

В исходных материалах ИКМ-1 и ИКМ-3 оценены как пригодные к переработке после предварительной подготовки, а ИКМ-2 как условно пригодный, поскольку у него выше кислотное и пероксидное числа. Для всех образцов целесообразны фильтрация и сушка; необходимость дополнительной химической подготовки следует определять по фактическим показателям сырья и выбранному режиму процесса.

Заключение

Газохроматографический анализ показал, что исследованные образцы ишлатилган подсолнечного масла содержат преимущественно линолевую (56,423–62,741 %) и олеиновую (22,066–29,528 %) кислоты. Наиболее высокие значения кислотного числа (1,42 мг KOH/г), пероксидного числа (168,6 ммоль O_2/кг) и влажности (0,92 %) выявлены в образце ИКМ-2 после жарки рыбы. Повторное использование масла сопровождалось увеличением кислотного числа на 66,7–69,4 %, а изменение пероксидного числа свидетельствовало об образовании и последующем разложении продуктов окисления. Все исследованные образцы

могут рассматриваться в качестве сырья для производства биодизеля после предварительной подготовки, включающей фильтрацию и сушку, с дополнительной химической обработки ИКМ-2.

Список литературы

1. Национальный комитет по статистике Республики Узбекистан. Объём производства подсолнечного масла крупными предприятиями за январь–август 2025 года [Электронный ресурс]. URL: https://stat.uz/en/press-center/news-of-committee/64277-kungabo-ar-jo-i-ishlab-chi-arish-azhmi-2-barobarga-oshgan-4 (дата обращения: 17.10.2026).
2. Исаматова Д.Н., Исмаилов О.Ю., Юсупов Р.А., Зафар М. Динамика производства биодизельного топлива и методы его получения // Universum: технические науки: электронный научный журнал. – 2025. – Ч. 5, № 3 (132). – С. 38–41. – DOI: 10.32743/UniTech.2025.132.3. URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/category/3132.
3. Gnanaprakasam A., Sivakumar V.M., Surendhar A., Thirumarimurugan M., Kannadasan T. Recent Strategy of Biodiesel Production from Waste Cooking Oil and Process Influencing Parameters: A Review // Journal of Energy. – 2013. – T. 2013. – Art. 926392. – P. 1–10. – DOI: 10.1155/2013/926392.
4. Juraev T.E., Ismailov O.Y., Yakubov Y.Y., Auesbaev A.U., Isamatova D.N., Radjiboev D.P., Boltaboeva M.J. Investigation of the Physicochemical Properties of Recovered Oil by Determining the Optimal Amounts of Acids and Adsorbents in the Used Oil Recycling Process // Chemical Problems. – 2025. – T. 23, № 4. – P. 483–492. – DOI: 10.32737/2221-8688-2025-4-483-492.
5. Kulkarni M.G., Dalai A.K. Waste Cooking Oil–An Economical Source for Biodiesel: A Review // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2006. – T. 45, № 9. – P. 2901–2913. – DOI: 10.1021/ie0510526.
6. Lopresto C.G., De Paola M.G., Calabrò V. Importance of the Properties, Collection, and Storage of Waste Cooking Oils to Produce High-Quality Biodiesel – An Overview // Biomass and Bioenergy. – 2024. – T. 189. – Art. 107363. – DOI: 10.1016/j.biombioe.2024.107363.
7. Yaakob Z., Mohammad M., Alherbawi M., Alam Z., Sopian K. Overview of the Production of Biodiesel from Waste Cooking Oil // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2013. – T. 18. – P. 184–193. – DOI: 10.1016/j.rser.2012.10.016.
8. Cordero-Ravelo V., Schallenberg-Rodriguez J. Biodiesel Production as a Solution to Waste Cooking Oil (WCO) Disposal. Will Any Type of WCO Do for a Transesterification Process? A Quality Assessment // Journal of Environmental Management. – 2018. – T. 228. – P. 117–129. – DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.08.106.
9. Mohammed A.R., Bandari C. Lab-Scale Catalytic Production of Biodiesel from Waste Cooking Oil – A Review // Biofuels. – 2020. – T. 11, № 4. – P. 409–419. – DOI: 10.1080/17597269.2017.1370882.

10. Sahar, Sadaf S., Iqbal J., Ullah I., Bhatti H.N., Nouren S., Rehman H.-ur, Nisar J., Iqbal M. Biodiesel Production from Waste Cooking Oil: An Efficient Technique to Convert Waste into Biodiesel // Sustainable Cities and Society. – 2018. – T. 41. – P. 220–226. – DOI: 10.1016/j.scs.2018.05.037.

References

1. National Statistics Committee of the Republic of Uzbekistan. Volume of Sunflower Oil Production by Large Enterprises in January–August 2025 [Electronic resource]. – 2025. (accessed: 17 October 2026). – URL: https://stat.uz/en/press-center/news-of-committee/64277-kungabo-ar-jo-i-ishlab-chi-arish-azhmi-2-barobarga-oshgan-4.
2. Isamatova, D.N., Ismailov, O. Yu., Yusupov, R.A., Zafar, M. Dynamics of Biodiesel Fuel Production and Methods of Its Production // Universum: Technical Sciences: Electronic Scientific Journal. – 2025. – Pt. 5, No. 3 (132). – P. 38–41. – DOI: 10.32743/UniTech.2025.132.3. – URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/category/3132.
3. Gnanaprakasam, A., Sivakumar, V.M., Surendhar, A., Thirumarimurugan, M., Kannadasan, T. Recent Strategy of Biodiesel Production from Waste Cooking Oil and Process Influencing Parameters: A Review // Journal of Energy. – 2013. – Vol. 2013. – Art. 926392. – P. 1–10. – DOI: 10.1155/2013/926392.
4. Juraev, T.E., Ismailov, O.Y., Yakubov, Y.Y., Auesbaev, A.U., Isamatova, D.N., Radjiboev, D.P., Boltaboeva, M.J. Investigation of the Physicochemical Properties of Recovered Oil by Determining the Optimal Amounts of Acids and Adsorbents in the Used Oil Recycling Process // Chemical Problems. – 2025. – Vol. 23, No. 4. – P. 483–492. – DOI: 10.32737/2221-8688-2025-4-483-492.
5. Kulkarni, M.G., Dalai, A.K. Waste Cooking Oil–An Economical Source for Biodiesel: A Review // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2006. – Vol. 45, No. 9. – P. 2901–2913. – DOI: 10.1021/ie0510526.
6. Lopresto, C.G., De Paola, M.G., Calabrò, V. Importance of the Properties, Collection, and Storage of Waste Cooking Oils to Produce High-Quality Biodiesel: An Overview // Biomass and Bioenergy. – 2024. – Vol. 189. – Art. 107363. – DOI: 10.1016/j.biombioe.2024.107363.
7. Yaakob, Z., Mohammad, M., Alherbawi, M., Alam, Z., Sopian, K. Overview of the Production of Biodiesel from Waste Cooking Oil // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2013. – Vol. 18. – P. 184–193. – DOI: 10.1016/j.rser.2012.10.016.
8. Cordero-Ravelo, V., Schallenberg-Rodriguez, J. Biodiesel Production as a Solution to Waste Cooking Oil (WCO) Disposal. Will Any Type of WCO Do for a Transesterification Process? A Quality Assessment // Journal of Environmental Management. – 2018. – Vol. 228. – P. 117–129. – DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.08.106.
9. Mohammed, A.R., Bandari, C. Lab-Scale Catalytic Production of Biodiesel from Waste Cooking Oil: A Review // Biofuels. – 2020. – Vol. 11, No. 4. – P. 409–419. – DOI: 10.1080/17597269.2017.1370882.

10. Sahar, S., Sadaf, S., Iqbal, J., Ullah, I., Bhatti, H.N., Nouren, S., Rehman, H. ur, Nisar, J., Iqbal, M. Biodiesel Production from Waste Cooking Oil: An Efficient Technique to Convert Waste into Biodiesel // Sustainable Cities and Society. – 2018. – Vol. 41. – P. 220–226. – DOI: 10.1016/j.scs.2018.05.037.

Статья поступила в редакцию: 30.10.2026
Статья принята к публикации: 05.11.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 666.94

DOI: 10.32743/UniTech.2026.152.11.23749

Влияние механоактивированного гранодиорита на свойства композиционных портландцементов

Кабулова Лола Балтамуратовна
PhD, доц.
кафедры Химии, Нукусский государственный педагогический институт
Республика Узбекистан, Каракалпакстан, г. Нукус
ORCID: 0009-0005-7245-0611
E-mail: kabulova1806@mail.ru

Оразимбетова Гулистан Жаксиликовна
д-р. техн. наук, (DSc), и.о. проф., заведующий кафедрой Материаловедения и химической инженерии, Андижанский государственный технический институт
Республика Узбекистан, г. Андижан
ORCID: 0000-0001-8881-5826
E-mail: gulistanorazimbetova0430@gmail.com

Айимбетов Максетбай Жолибаевич
канд. техн. наук, проф.
кафедры Химическая инженерия Каракалпакский государственный университет имени Бердаха
Республика Узбекистан, Каракалпакстан, г. Нукус
ORCID: 0009-0003-4389-4163
E-mail: maksetbay1969@gmail.com

Effect of mechanically activated granodiorite on the properties of composite portland cements

Kabulova Lola Baltamuratovna
doctor of Technical Sciences (PhD)
Associate Professor of the Department of Chemistry, Nukus State Pedagogical Institute
Uzbekistan (Karakalpakstan), Nukus

Orazimbetova Gulistan Jaksilikovna
D.Sc., Acting Professor
Head of the Department of Materials Science and Chemical Engineering, Andijan State Technical Institute
Uzbekistan, Andijan

Библиографическое описание: Кабулова Л.Б., Оразимбетова Г.Ж., Айимбетов М.Ж. Влияние механоактивированного гранодиорита на свойства композиционных портландцементов // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23749

Ayimbetov Maksetbay Zholibayevich
candidate of Technical Sciences, Professor
in the Department of Chemical Engineering at Berdakh Karakalpak State University
Uzbekistan (Karakalpakstan), Nukus

Аннотация

В статье рассмотрено влияние механоактивированного гранодиорита Актауского месторождения (Республика Каракалпакстан) на строительно-технические свойства, гидравлическую активность, фазовый состав и прочность композиционных портландцементов. Добавку в количестве 10, 20, 30 и 40 % от массы вяжущего вводили при совместном помоле с клинкером и гипсом в лабораторной шаровой мельнице до остатка на сите №008 в пределах 2,0 – 2,6 %. Нормальную густоту, сроки схватывания и предел прочности при сжатии в возрасте 1, 3 и 28 суток определяли по ГОСТ 30744-2001, активность добавки оценивали по ГОСТ 25094-2015 с расчётом критерия Стьюдента (12 параллельных определений), фазовый состав изучали методом рентгенофазового анализа. Показано, что оптимальная дозировка гранодиорита составляет 10 %: 28-суточная прочность при сжатии достигает 53,8 МПа, что практически соответствует прочности бездобавочного портландцемента (54,0 МПа) при экономии 10 % клинкера. По прочности цементы с гранодиоритом превосходят составы с порфиритом, применяемым на заводе: при 10 % добавки прочность составляет 53,8 МПа против 45,1 МПа, при 20 % – 44,1 МПа против 39,3 МПа. Введение 20 % гранодиорита позволяет получать цемент класса 42,5Н (44,1 МПа), введение 30 – 40 % – класса 32,5Н по прочности (34,2 – 36,3 МПа). Нормальная густота цементного теста с добавкой находится в пределах 25,6 – 27,6 %, начало схватывания – 60 – 90 мин. Значение критерия Стьюдента (t=6,64) превышает критическое (2,07 при p=0,05), но не достигает порога 15,0, установленного ГОСТ 25094-2015 для активных добавок; индекс активности по отношению к смеси с кварцевым песком равен 117,2 %. По данным рентгенофазового анализа, интенсивность пиков портландита убывает быстрее, чем снижается доля клинкера, что говорит о протекании пуццолановой реакции. Механоактивированный гранодиорит работает одновременно как микронаполнитель и умеренно активная пуццолановая добавка и может использоваться при выпуске композиционных портландцементов.

Abstract

The paper considers the effect of mechanically activated granodiorite from the Aktau deposit (Republic of Karakalpakstan) on the construction and technical properties, hydraulic activity, phase composition, and strength of composite Portland cements. The additive in amounts of 10, 20, 30, and 40 wt.% of the binder was introduced by intergrinding with clinker and gypsum in a laboratory ball mill to a residue of 2.0 – 2.6 % on the No. 008 sieve. Normal consistency, setting time, and compressive strength at 1, 3, and 28 days were determined according to GOST 30744-2001; the additive activity was evaluated according to GOST 25094-2015 using Student’s t-test (12 parallel determinations); and the phase composition was studied by X-ray diffraction analysis. The optimal granodiorite dosage was found to be 10 %: the 28-day compressive strength reaches 53.8 MPa, which virtually matches the strength of additive-free Portland cement (54.0 MPa) with a 10 %

clinker saving. In terms of strength, cements with granodiorite outperform compositions with porphyrite currently used at the plant: at 10 % dosage, the strength is 53.8 MPa versus 45.1 MPa, and at 20 %, 44.1 MPa versus 39.3 MPa. Introducing 20 % granodiorite yields class 42.5N cement (44.1 MPa), while 30 – 40 % yields class 32.5N in terms of strength (34.2 – 36.3 MPa). The normal consistency of the cement paste with the additive is 25.6 – 27.6 %, and the initial setting time is 60 – 90 min. Student's t-value (t=6.64) exceeds the critical value (2.07 at p=0.05) but does not reach the threshold of 15.0 set by GOST 25094-2015 for active additives; the activity index relative to the quartz sand mixture is 117.2 %. According to X-ray diffraction data, the intensity of portlandite peaks decreases faster than the clinker fraction, indicating a pozzolanic reaction. Mechanically activated granodiorite acts both as a microfiller and a moderately active pozzolanic additive and can be used in the production of composite Portland cements.

Ключевые слова: композиционный портландцемент, гранодиорит, механоактивация, минеральная добавка, микронаполнитель, пуццолановая активность, прочность при сжатии, рентгенофазовый анализ.

Keywords: composite Portland cement, granodiorite, mechanical activation, mineral additive, microfiller, pozzolanic activity, compressive strength, X-ray diffraction analysis.

Финансирование: исследование выполнено без внешнего финансирования.
Funding: The study received no external funding.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

Благодарности: при подготовке рукописи использовался инструмент искусственного интеллекта Perplexity AI. Инструмент применялся для подготовки английской аннотации, для проверки DOI и оформления списка литературы. Все экспериментальные данные получены авторами самостоятельно; результаты работы инструмента проверены авторами по первичным записям испытаний, авторы несут полную ответственность за содержание статьи.

Acknowledgements: The AI tool Perplexity AI was used in the preparation of the manuscript. The tool was used to prepare the English abstract, verify DOIs, and format the reference list. All experimental data were obtained by the authors independently; the results produced by the tool were verified by the authors against the primary test records, and the authors bear full responsibility for the content of the article.

Введение

Обжиг портландцементного клинкера связан с высокими затратами топлива и электроэнергии и сопровождается большими выбросами CO_2 [13; 14]. Поэтому в цементной промышленности давно используют частичную замену клинкера минеральными добавками – это позволяет снизить себестоимость вяжущего и уменьшить нагрузку на окружающую среду.

Для Узбекистана, где объёмы строительства продолжают расти, важно вовлекать в производство местное сырьё, особенно в удалённых регионах (Каракалпакстан). По производственным отчётам СП ООО «Каракалпак-Цемент» (сентябрь 2025 г.), замена 20 % клинкера добавкой даёт экономию порядка 30 кг угля и 12 кВт·ч электроэнергии на каждую тонну цемента. Сейчас на заводе используют порфирит месторождения «Куянчик», но его активность невысока: при введении 10 % порфирита 28-суточная прочность цемента составляет 45,1 МПа. В связи с этим возникла задача подобрать более эффективное местное сырьё.

Подходящей породой может служить гранодиорит Актауского месторождения (расположено в 85 км от г. Нукуса, запасы оцениваются в 2442 тыс. $м^3$). Гранодиорит – это плотная кислая магматическая порода, состоящая в основном из плагиоклаза (44 %) и кварца (31 %). Глинистых минералов в ней нет, поэтому при введении в цемент она не должна сильно повышать водопотребность теста. В ряде зарубежных работ отмечено, что тонкомолотый порошок гранодиорита при замене 7 – 9 % цемента уплотняет структуру бетона, повышает его прочность и проявляет пуццолановую активность [7; 8; 11]. В исходном виде плотные изверженные породы малоактивны, однако при тонком измельчении (механоактивации) удельная поверхность частиц резко возрастает, а их поверхностный слой частично аморфизируется, причём энергозатраты на такой помол ниже, чем при термической обработке [5; 15].

Ранее нами были изучены основные физико-механические свойства цементов с добавкой 10 – 40 % механоактивированного гранодиорита [10]. В данной статье эти результаты дополнены оценкой гидравлической активности по критерию Стьюдента, данными рентгенофазового анализа затвердевших растворов, а также сравнением с традиционной заводской добавкой – порфиритом.

Цель работы – установить закономерности влияния механоактивированного гранодиорита Актауского месторождения на строительно-технические свойства, фазообразование и кинетику набора прочности композиционных портландцементов для обоснования рациональных параметров их производства. В ходе работы решались следующие задачи:

- определить нормальную густоту, сроки схватывания и прочность цементов с 10 – 40 % гранодиорита;
- оценить активность добавки по критерию Стьюдента;
- исследовать фазовый состав цементно-песчаных растворов методом РФА;
- установить соответствие полученных составов классам прочности по ГОСТ 31108-2020 [3];
- сравнить эффективность гранодиорита и порфирита.

Материалы и методы

Работа выполнена в рамках научно-технического сотрудничества с СП ООО «Каракалпак-Цемент». Ранее сотрудники Института общей и неорганической химии АН РУз [6] уже проводили для этого предприятия оценку гидравлической и пуццолановой

активности порфирита месторождения «Куянчик» Караузякского района (х/д № 17-Ц/23). В настоящей работе изучена более перспективная местная порода – гранодиорит Актауского месторождения Республики Каракалпакстан.

Для приготовления вяжущих использовали портландцементный клинкер СП ООО «Каракалпак-Цемент», гипсовый камень Джамансайского месторождения и гранодиорит Актауского месторождения. Контрольным (бездобавочным) составом служил заводской портландцемент (95 % клинкера + 5 % гипса) с прочностью при сжатии в возрасте 28 суток 54,0 МПа.

Химический состав сырья определяли по ГОСТ 5382 – 2019 [4]. Гранодиорит содержит: SiO2 – 68,4 %, Al2O3 – 15,3 %, CaO – 4,79 %, Fe2O3 – 3,42 %, K2O – 2,45 %, Na2O – 0,03 %; MgO не обнаружен.

Механоактивацию гранодиорита проводили при совместном помоле с клинкером и гипсом в лабораторной шаровой мельнице периодического действия серии PSSM (барабан Ø500 × 500 мм, частота вращения 48 мин$^{-1}$, что составляет около 80 % критической, мощность электродвигателя 1,5 кВт). Мелющая загрузка массой 100 кг включала кованые стальные шары (60 кг: Ø40 мм – 43 шт., Ø50 мм – 37 шт., Ø60 мм – 24 шт., Ø70 мм – 9 шт.) и стальные цильпебсы Ø25 × 35 мм (40 кг); масса одной загружаемой пробы составляла 5 кг (соотношение материал:мелющие тела – 1:20). Длительность помола заранее не фиксировали: размол вели до остатка на сите № 008 в пределах 2,0-2,6 %, на что уходило τ = 6-10 мин. Такой подход позволил получить близкую гранулометрию всех составов по остатку на сите и исключить влияние недомола при сравнении разных дозировок, хотя удельная поверхность при этом менялась (табл. 1). Удельный расход электроэнергии, рассчитанный по номинальной мощности привода $E = \frac{P \cdot \tau}{60 \cdot m} = \frac{1{,}5 \cdot \tau}{60 \cdot 0{,}005} = 5\tau$, составил 30-50 кВт·ч/т (реальное потребление ниже за счёт недогрузки двигателя). Содержание гранодиорита в вяжущем меняли от 10 до 40 мас. % при постоянной добавке гипса 5 %.

Гидравлическую активность гранодиорита определяли по ГОСТ 25094-2015 [1] с расчётом критерия Стьюдента; конец схватывания и водостойкость проверяли по обязательным приложениям В и С O`zMSt 336:2024 [12]. Для этих испытаний материалы мололи отдельно: гранодиорит – до остатка на сите №008 13,6 – 14,0 % (по нормативу требуется 13 – 15 %), клинкер – до 7,3 %, стандартный песок – до 13,8 %, гипсовый камень – до 5,7 %. Из смесей «600 г клинкера + 1400 г гранодиорита + 100 г гипса» и «600 г клинкера + 1400 г кварцевого песка + 100 г гипса» формовали балочки 40х40х160 мм, пропаривали их (выдержка 2 ч при 20 °С, подъём температуры до 85 °С за 3 ч, изотермическая выдержка 6 ч и охлаждение 2 ч) и испытывали по 12 половинок балочек каждой серии. Критерий Стьюдента вычисляли по формуле: $t = 2{,}45 \cdot \frac{\overline{X}_д - \overline{X}_п}{\sqrt{\frac{S_д^2 + S_п^2}{2}}}$ при выполнении условий $S_д \approx S_п \le 2{,}0$ МПа и $S^2_д / S^2_п \le 2{,}82$.

Полученное значение сравнивали с критическим 2,07 (уровень значимости 0,05 при 22 степенях свободы) и с нормативным значением 15,0 по п. 5.4.5 ГОСТ 25094-2015 [1].

Физико-механические испытания цементов проводили по ГОСТ 30744-2001 [2] на образцах-балочках 40х4х160 мм из раствора 1:3 при В/Ц=0,50. Использовали стандартный полифракционный песок (China ISO Standard Sand, Xiamen ISO Standard Sand Co., Ltd.).

Водопотребность оценивали по расходу воды на затворение 500 г цемента до нормальной густоты. Класс прочности определяли по 28-суточным результатам согласно ГОСТ 31108-2020 [3].

Рентгенофазовый анализ (РФА) выполняли на настольном дифрактометре FRINGE C1600 (LANScientific, KHP; вертикальный гониометр θ-2θ, радиус 150 мм, медный анод, детектор DPPC, погрешность по углу 2θ не более ±0,02°) в диапазоне углов 2θ=10-100°. с шагом 0,02° на излучении CuKα (λ=1,5419 Å). Фазы расшифровывали в программе Match! (Crystal Impact) по базе данных COD. Съёмку проводили на образцах цементно-песчаного раствора в возрасте 28 суток.

Результаты и обсуждение

Результаты физико-механических испытаний бездобавочного цемента и составов с добавкой 10-40 мас. % механоактивированного гранодиорита приведены в табл. 1.

Таблица 1. Физико-механические свойства композиционных цементов

Состав: клинкер / гранодиорит / гипс, %	Норм. густота, %	Сроки схватывания (начало / конец), мин	Прочность при изгибе, МПа (1/3/28 сут)	Прочность при сжатии, МПа (1/3/28 сут)	Остаток на сите 008, %	Уд. поверхность, $м^2/кг$	Расплыв конуса, мм	$CaO_{св}$, %
95/0/5 (контроль, бездобавочный ПЦ)	28,4	78 / 94	4,7 / 6,2 / 8,6	12,5 / 36,9 / 54,0	5,1	320,0	108-111	0,89
85 / 10 / 5	25,6	84 / 107	3,7 / 5,5 / 7,1	17,2 / 33,8 / 53,8	2,6	309,5	112-115	1,62
75 / 20 / 5	25,8	60 / 87	3,7 / 5,0 / 6,8	16,3 / 29,9 / 44,1	2,4	351,5	112-115	1,47
65 / 30 / 5	26,6	73 / 113	3,1 / 4,7 / 5,6	12,8 / 23,3 / 36,3	2,0	329,4	112-115	1,55
55 / 40 / 5	27,6	90 / 115	2,6 / 4,9 / 6,0	11,1 / 21,1 / 34,2	2,3	307,8	112-115	0,69

Из данных табл. 1 видно, что введение тонкомолотого гранодиорита улучшает подвижность растворной смеси: расплыв конуса возрастает со 108-111 мм у контрольного цемента до 112-115 мм. Нормальная густота теста у всех составов с добавкой (25,6-27,6 %) ниже, чем у бездобавочного портландцемента (28,4 %), что объясняется отсутствием глинистых примесей в породе. Внутри добавочной серии по мере увеличения доли гранодиорита с 10 до 40 % нормальная густота плавно растёт с 25,6 до 27,6 % за счёт увеличения суммарной тонкости помола. Сроки схватывания всех проб укладываются в стандартные пределы: начало схватывания – 60-90 мин, конец – 87-115 мин. Содержание свободного $CaO_{св}$ не превышает 1,62 %, поэтому все составы выдерживают испытания на равномерность изменения объёма.

По результатам прочностных испытаний лучшей оказалась дозировка 10 мас. % гранодиорита. Этот состав показывает высокую прочность уже в первые сутки твердения (17,2 МПа при сжатии против 12,5 МПа у контрольного цемента), а к 28 суткам набирает 53,8 МПа при сжатии и 7,1 МПа при изгибе. Это практически равно прочности бездобавочного портландцемента (54,0 МПа) – замена 10 % клинкера не снижает марочную прочность и позволяет отнести вяжущее к классу 52,5Н по ГОСТ 31108-2020 [3]. При увеличении доли гранодиорита до 20 % прочность в 28 суток составляет 44,1 МПа при сжатии и 6,8 МПа при изгибе (класс 42,5Н при экономии 20 % клинкера). При 30 и 40 % добавки прочность снижается до 36,3 и 34,2 МПа соответственно (класс 32,5Н по прочности), так как доля клинкера в вяжущем заметно сокращается.

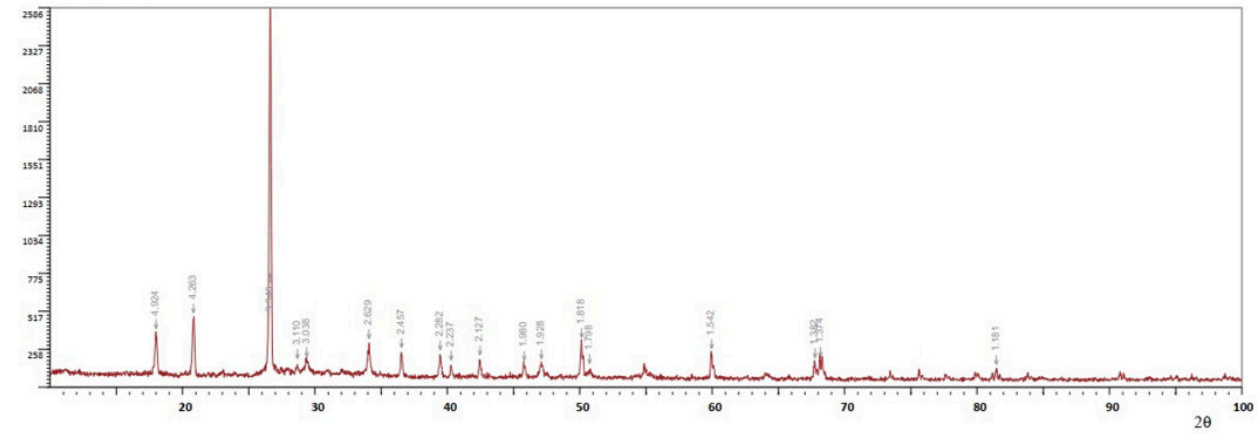
Сопоставление с заводскими испытаниями традиционной добавки – порфирита месторождения «Куянчик» (х/д № 17-Ц/23) [6] показывает, что гранодиорит работает эффективнее (табл. 2). При 10 % добавки замена порфирита на механоактивированный гранодиорит повышает 28-суточную прочность с 45,1 до 53,8 МПа (на 19,3 %), при 20 % - с 39,3 до 44,1 МПа (на 12,2 %).

Таблица 2. Сравнительные показатели прочности цементов с добавкой порфирита и механоактивированного гранодиорита

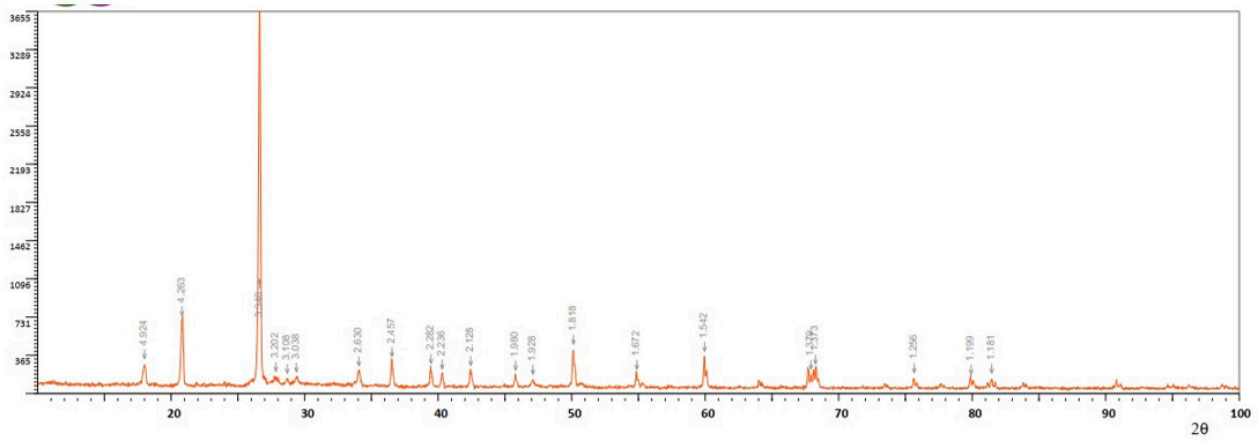
Вид добавки	Дозировка, мас. %	Прочность при сжатии в возрасте 28 сут, МПа	Класс прочности
Порфирит (традиционная)	10	45,1	42,5Н
Порфирит (традиционная)	20	39,3	32,5Н
Гранодиорит (механоактивированный)	10	53,8	52,5Н
Гранодиорит (механоактивированный)	20	44,1	42,5Н

Чтобы понять, за счёт чего сохраняется высокая прочность при замене части клинкера, провели рентгенофазовый анализ 28-суточных цементного камня (рис. 1). На всех дифрактограммах самым высоким является пик кварца (d=0,334 нм при 2 26,6), принятый за 1000 отн.ед. Поскольку кварц преобладает уже при 10 % добавки, основная его часть относится к стандартному кварцевому песку, на котором готовили раствор. В составах с 20 и 30 % гранодиорита видны слабые пики плагиоклаза (d=0,319-0,324 нм), принадлежащие непрореагировавшим частицам породы.

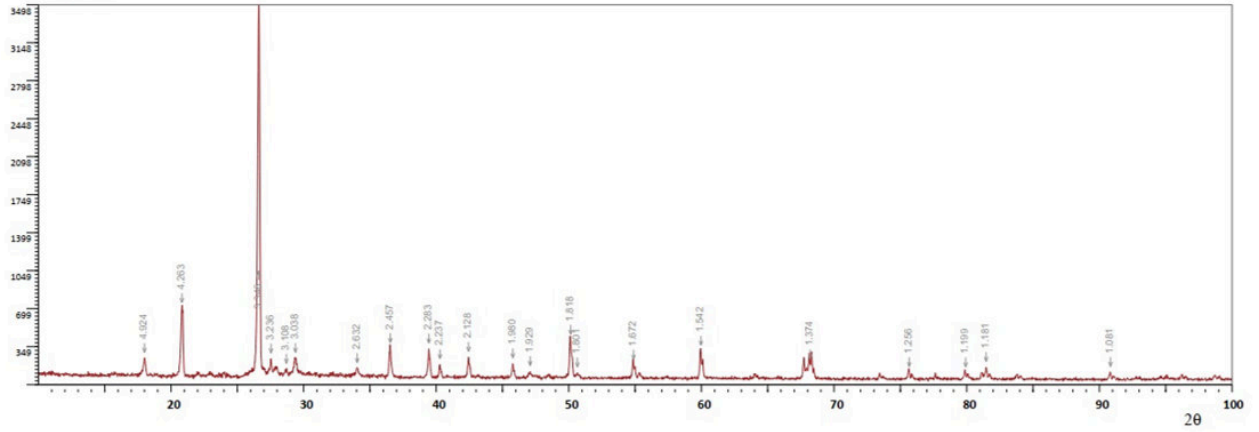
Портландит $Ca(OH)_2$ фиксируется по рефлексам d=0,492 и 0,263 нм. Их относительная интенсивность при 10 % добавки составляет 106 и 69 отн. ед., при 20 % снижается до 51 и 35 отн. ед., а при 30 % – до 39 и 17 отн. ед. Так как дифрактограмму контрольного раствора без добавки в этой серии не снимали, изменение количества портландита оценивали по отношению к составу с 10 % гранодиорита. При увеличении дозировки добавки с 10 до 30 % интенсивность рефлексов $Ca(OH)_2$ падает заметно сильнее, чем уменьшается доля клинкера (с 85 до 65 %). Это говорит о том, что активный кремнезём измельчённого гранодиорита связывает свободный гидроксид кальция в результате пуццолановой реакции с образованием дополнительных гидросиликатов кальция. Небольшая часть $Ca(OH)_2$ могла перейти в карбонат (на дифрактограммах присутствует рефлекс кальцита d=0,304 нм), а сама оценка по высоте пика d=0,492 нм является полуколичественной из-за возможной преимущественной ориентации пластинчатых кристаллов портландита, но общая динамика связывания извести прослеживается чётко.



а)



б)



в)

Рисунок 1. Дифрактограммы рентгенофазового анализа цементного камня (28 сут) с добавкой гранодиорита: а-10 %; б-20 %; в-30 %

Полученные результаты согласуются с работами других авторов. Так, Faried и др. [7] показали, что тонкомолотый гранодиоритовый порошок при дозировке около 9 % связывает портландит и повышает прочность цементного камня. В наших опытах близкая дозировка (10 %) позволила заменить 10 % клинкера без потери прочности вяжущего. В работе

Mahmoud и др. [11] также отмечено, что добавка порошка гранодиорита уплотняет структуру бетона и повышает его термостойкость и радиационно-защитные свойства, что может представлять интерес при разработке специальных бетонов на базе местного сырья.

Таким образом, комплексные физико-механические испытания, статистическая оценка по критерию Стьюдента (t=6,64) и данные рентгенофазового анализа убедительно доказывают целесообразность использования механоактивированного гранодиорита Актауского месторождения в производстве композиционных портландцементов. Сочетание тонкодисперсного микронаполнения и пуццолановой активности позволяет успешно компенсировать снижение доли клинкера, обеспечивая высокие эксплуатационные характеристики вяжущего и превосходя по эффективности традиционно применяемый на производстве порфирит.

Заключение

1. Установлена возможность получения композиционных портландцементов с добавкой механоактивированного гранодиорита Актауского месторождения. Рациональной является дозировка 10 мас. %: 28-суточная прочность при сжатии достигает 53,8 МПа (при изгибе – 7,1 МПа), что соответствует уровню бездобавочного портландцемента (54,0 МПа) и классу прочности 52,5Н по ГОСТ 31108-2020 при снижении расхода клинкера на 10 %.

2. Введение 20 мас. % гранодиорита позволяет выпускать цемент класса 42,5Н с прочностью 44,1 МПа при сжатии и 6,8 МПа при изгибе. При 30 и 40 % добавки 28-суточная прочность снижается до 36,3 и 34,2 МПа (класс 32,5Н по прочности), а начало схватывания у состава с 30 % добавки (73 мин) находится на нижней границе нормы.

3. По прочностным показателям механоактивированный гранодиорит превосходит порфирит месторождения «Куянчик», применяемый на СП ООО «Каракалпак-Цемент»: при 10 % добавки прочность выше на 19,3 % (53,8 против 45,1 МПа), при 20 % - на 12,2 % (44,1 против 39,3 МПа).

4. При оценке гидравлической активности по ГОСТ 25094-2015 расчётный критерий Стьюдента (t=6,64) превышает критическое значение 2,07 ($p<0,05$), а индекс активности относительно смеси с кварцевым песком составляет 117,2 %, но t-критерий ниже порога 15,0 для активных пуццолан. Следовательно, гранодиорит проявляет комбинированное действие работает как уплотняющий микронаполнитель и умеренно активный пуццолановый компонент.

5. Данные РФА подтверждают протекание пуццолановой реакции: при росте содержания гранодиорита с 10 до 30 % интенсивность пиков портландита $Ca(OH)_2$ снижается быстрее доли клинкерной составляющей, что компенсирует разбавление клинкера при дозировке 10 %.

Список литературы

1. ГОСТ 25094-2015. Добавки активные минеральные для цементов. Метод определения активности. – Москва: Стандартинформ, 2016. – 8 с.
2. ГОСТ 30744-2001. Цементы. Методы испытаний с использованием полифракционного песка. – Москва: Стандартинформ, 2002. – 35 с.

3. ГОСТ 31108-2020. Цементы общестроительные. Технические условия. – Москва: Стандартинформ, 2020. – 20 с.
4. ГОСТ 5382–2019. Цементы и материалы цементного производства. Методы химического анализа. – Москва: Стандартинформ, 2020. – 74 с.
5. Механохимическая активация дополнительных цементных материалов (SCMs) в строительстве. // NETZSCH Grinding & Dispersing: [сайт]. (дата обращения: 05.11.2026).
6. Определение гидравлической и пуццолановой активности порфирита месторождения «Куянчик» Караузякского района Республики Каракалпакстан для СП ООО «КАРАКАЛПАК СЕМЕНТ» MCN JSC: отчёт о НИР (хоздоговор № 17-Ц/23) / Институт общей и неорганической химии АН Республики Узбекистан. – Ташкент, 2023.
7. A.S. Faried, N. Fathy, W.M. Morsi [et al.]. Sustainable concrete production using granodiorite, alkali feldspar granite, and mafic metavolcanic rock powders as supplementary cementitious materials // Materials. – 2026. – T. 19, № 11. – Art. 2193. – DOI: 10.3390/ma19112193.
8. I.N. Fathy, M.E. Elfakharany, A.A. El-Sayed. Recycling of waste granodiorite powder as a partial cement replacement material in ordinary concrete // Advances in Materials Science. – 2024. – T. 24, № 3. – P. 56–88. – DOI: 10.2478/adms-2024-0017.
9. Iskandarova, M.I. O'zbekistonda portlandtsement ishlab chiqarishda keramika g'isht chiqindilarini faol mineral qo'shilma sifatida ishlatish xususiyatlari / M.I. Iskandarova, F.B. Atabayev, G.R. Tursunova [va boshq.] // Arxitektura, qurilish va dizayn. – 2025. – T. 20, № 2.
10. L.B. Kabulova, G. Zh. Effect of mechanically activated granodiorite of the Karatau deposit on the physical and mechanical properties of composite cements // Development of Science. – 2026. – T. 10, № 5. – P. 271–277.
11. A.A. Mahmoud, A.A. El-Sayed, A.M. Aboraya [et al.]. Influence of elevated temperature exposure on the residual compressive strength and radiation shielding efficiency of ordinary concrete incorporating granodiorite and ceramic powders // Scientific Reports. – 2025. – T. 15, № 1. – Art. 3572. – DOI: 10.1038/s41598-024-85043-2.
12. O'zMSt 336:2024. Additives for cements. Active mineral additives and fillers. Specifications. – Tashkent: Uzbek Standards Institute, 2024.
13. Scrivener, K.L. Eco-efficient cements: potential economically viable solutions for a low-CO_2 cement-based materials industry / K.L. Scrivener, V.M. John, E.M. Gartner // Cement and Concrete Research. – 2018. – T. 114. – P. 2–26. – DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.03.015.
14. Snellings, R. Supplementary cementitious materials / R. Snellings, G. Mertens, J. Elsen // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. – 2012. – T. 74, № 1. – P. 211–278. – DOI: 10.2138/rmg.2012.74.6.
15. Tole, I. Mechanochemical activation of natural clay minerals: an alternative to produce sustainable cementitious binders – review / I. Tole, K. Habermehl-Cwirzen, A. Cwirzen // Mineralogy and Petrology. – 2019. – T. 113, № 4. – P. 449–462. – DOI: 10.1007/s00710-019-00666-y.

References

1. GOST 5382 Cements and materials for cement production. Chemical analysis methods. Moscow: Standartinform, 2019. – Moscow: Standartinform, 2019. (In Russ.).
2. GOST 25094-2015. Active mineral additions for cements. Method of activity determination. Moscow: Standartinform, 2016. – Moscow: Standartinform, 2016. (In Russ.).
3. GOST 30744-2001. Cements. Methods of testing with using polyfraction standard sand. Moscow: GUP TsPP, 2002. – Moscow: GUP TsPP, 2002. (In Russ.).
4. GOST 31108 Common cements. Specifications. Moscow: Standartinform, 2020. – Moscow: Standartinform, 2020. (In Russ.).
5. Kabulova L.B., Orazimbetova G.Zh., Temirbaeva Zh.M. Effect of mechanically activated granodiorite of the Karatau deposit on the physical and mechanical properties of composite cements. Development of Science, 2026, vol. 10, iss. 5. Available at: (accessed November 5, 2026). [Электронный ресурс]. – P. 271–277. – URL: https://devos.uz/article.php?id=5479 (accessed: 21.11.2026). (In Russ.).
6. Mechanochemical activation of supplementary cementitious materials (SCMs) in construction. NETZSCH Grinding & Dispersing. Available at: (accessed November 5, 2026). [Электронный ресурс]. – URL: https://grinding.netzsch.com/ru/application-literature/mekhanokhimicheskaia-aktivatsiia-dopolnitelnykh-tsementnykh-materialov-v-stroitelstve (accessed: 21.11.2026). (In Russ.).
7. Faried A.S., Fathy N., Morsi W.M. [et al.]. Sustainable concrete production using granodiorite, alkali feldspar granite, and mafic metavolcanic rock powders as supplementary cementitious materials. Materials, 2026, vol. 19, no. 11, art. 2193. DOI: 10.3390/ma19112193.
8. Fathy I.N., Elfakharany M.E., El-Sayed A.A. Recycling of waste granodiorite powder as a partial cement replacement material in ordinary concrete // Advances in Materials Science. – 2024. – No. 3. – P. 56–88. – DOI: 10.2478/adms-2024-0017.
9. Iskandarova M.I., Atabayev F.B., Tursunova G.R., Abdullayev M.Ch. Features of the use of ceramic brick waste as an active mineral additive in Portland cement production. Arxitektura, qurilish va dizayn [Architecture, Construction and Design], 2025, vol. 20, no. 2, P. 614–618. (In Uzbek).
10. Mahmoud A.A., El-Sayed A.A., Aboraya A.M. [et al.]. Influence of elevated temperature exposure on the residual compressive strength and radiation shielding efficiency of ordinary concrete incorporating granodiorite and ceramic powders. Scientific Reports, 2025, vol. 15, no. 1, art. 3572. DOI: 10.1038/s41598-024-85043-2.
11. O'zMSt 336:2024. Additives for cements. Active mineral additives and fillers. Specifications. – Tashkent: Uzbek Standards Institute, 2024.
12. Scrivener K.L., John V.M., Gartner E.M. Eco-efficient cements: potential economically viable solutions for a low-CO_2 cement-based materials industry. Cement and Concrete Research, 2018, vol. 114, P. 2–26. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.03.015.
13. Snellings R., Mertens G., Elsen J. Supplementary cementitious materials. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2012, vol. 74, no. 1, P. 211–278. DOI: 10.2138/rmg.2012.74.6.

14. Tole I., Habermehl-Cwirzen K., Cwirzen A. Mechanochemical activation of natural clay minerals: an alternative to produce sustainable cementitious binders – review. Mineralogy and Petrology, 2019, vol. 113, no. 4, P. 449–462. DOI: 10.1007/s00710-019-00666-y.
15. Scientific and Technical Report «Determination of hydraulic and pozzolanic activity of porphyrite from the »Kuyanchik« deposit of the Karauzyak district of the Republic of Karakalpakstan for IP LLC »KARAKALPAK SEMENT« MCHJ QK» (Contract No. 17-Ts/23). Tashkent: Institute of General and Inorganic Chemistry, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, 2023. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию: 13.10.2026
Статья принята к публикации: 13.11.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 549+543.4+666.3

DOI: 10.32743/UniTech.2026.152.11.23719

Определение химико-минералогического состава и структуры бентонитовой глины Ходжейлийского месторождения Каракалпакстана

Кадырова Зулайхо Раимовна
д-р хим. наук, проф.
Институт общей и неорганической химии АН РУз
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: islamnasiba9495@gmail.com

Пирниязова Назира Султаниязовна
базовый докторант
Каракалпакский государственный университет имени Бердаха
Республика Узбекистан, Каракалпакстан, г. Нукус

Хожаметова Бийбимарям Кайповна
канд. техн. наук, проф.
Каракалпакский государственный университет имени Бердаха
Республика Узбекистан, Каракалпакстан, г. Нукус

Determination of the chemical and mineralogical composition and structure of bentonite clay from the Khojayli deposit of Karakalpakstan

Kadyrova Zulayho Raimovna
doctor of Chemical Sciences, Professor
Institute of General and Inorganic Chemistry of the Academy of Sciences
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Pirniyazova Nazira Sultaniyazovna
Doctoral student
Karakalpak State University named after Berdakh
Republic of Uzbekistan, Karakalpakstan, Nukus

Khojametova Biybimaryam Kaipovna
candidate of Technical Sciences, Professor
Karakalpak State University named after Berdakh
Republic of Uzbekistan, Karakalpakstan, Nukus

Библиографическое описание: Кадырова З.Р., Пирниязова Н.С., Хожаметова Б.К. Определение химико-минералогического состава и структуры бентонитовой глины Ходжейлийского месторождения Каракалпакстана // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23719

Аннотация

В работе представлены результаты комплексного физико-химического исследования химико-минералогического состава, структурных особенностей и технологических характеристик бентонитовой глины Ходжейлийского месторождения Республики Каракалпакстан. Актуальность исследования обусловлена необходимостью расширения отечественной минерально-сырьевой базы и повышения эффективности производства строительных материалов в соответствии с приоритетными государственными программами. Для изучения образцов применён комплекс аналитических методов: классический силикатный анализ, рентгенофазовый анализ (РФА) и Фурье-ИК-спектроскопия (FTIR). Установлено, что сырьё относится к группе кислых алюмосиликатов (содержание SiO_2 58,4 мас. %, Al_2O_3 17,0 мас. %, кремнезёмный модуль 3,44) и содержит плавнеобразующие оксиды (K_2O + Na_2O = 4,19 мас. %; MgO = 2,07 мас. %), способствующие интенсификации процессов спекания. По данным РФА и ИК-спектроскопии (полосы поглощения 3620 и 1035 $см^{-1}$) основной глинистой фазой является монтмориллонит; сопутствующие минералы – кварц, кальцит и гидрослюда. Выявленные структурно-минералогические особенности подтверждают высокую пластифицирующую и связующую способность бентонита. Использование ходжейлийской бентонитовой глины в качестве пластифицирующей добавки является научно обоснованным и перспективным решением для улучшения формовочных свойств сырьевых масс и получения стеновых керамических материалов с улучшенными эксплуатационными свойствами. Полученные данные могут быть использованы при разработке составов керамических масс на основе местного минерального сырья Республики Каракалпакстан.

Abstract

This paper presents the results of a comprehensive physicochemical study of the chemical and mineralogical composition, structural features and technological characteristics of bentonite clay from the Khojayli deposit in the Republic of Karakalpakstan. The relevance of the study is driven by the need to expand the domestic mineral resource base and to increase the efficiency of construction-materials production in line with priority state programmes. The samples were examined using classical silicate analysis, X-ray diffraction (XRD) and Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR). The raw material was found to belong to the group of acidic aluminosilicates (SiO_2 58.4 wt %, Al_2O_3 17.0 wt %, silica modulus 3.44) and to contain fluxing oxides (K_2O + Na_2O = 4.19 wt %; MgO = 2.07 wt %) that promote sintering. According to XRD and FTIR data (absorption bands at 3620 and 1035 cm^{-1}), the main clay phase is montmorillonite, accompanied by quartz, calcite and hydromica. The identified structural and mineralogical features confirm the high plasticizing and binding capacity of the bentonite. The use of Khojayli bentonite clay as a plasticizing additive is a scientifically grounded and promising solution for improving the molding properties of ceramic masses and for producing wall ceramics with enhanced performance characteristics. The data obtained can be used to develop ceramic mixtures based on local mineral raw materials of the Republic of Karakalpakstan.

Ключевые слова: Ходжейлийский бентонит, монтмориллонит, химический состав, ИК-спектроскопия, рентгенофазовый анализ, стеновая керамика, Каракалпакстан, силикатный анализ.

Keywords: Khojayli bentonite, montmorillonite, chemical composition, FTIR spectroscopy, X-ray diffraction, wall ceramics, Karakalpakstan, silicate analysis.

Введение

В настоящее время современное материаловедение строительной керамики ориентировано на создание энергоэффективных, долговечных и механически прочных строительных изделий и материалов с использованием отечественных минерально-сырьевых ресурсов [1, 2].

При этом следует отметить, что в рамках реализации Постановлений Президента Республики Узбекистан № ПП-4335 «О мерах по ускоренному развитию промышленности строительных материалов» от 23 мая 2019 г. и № ПП-5130 «О дополнительных мерах по развитию промышленности строительных материалов» от 9 июня 2021 г. приоритетными задачами определены расширение использования местной сырьевой базы, снижение энергоемкости производства и выпуск эффективных стеновых материалов [3, 4]. В условиях Республики Каракалпакстан решение этих задач осложнено тем, что преобладающие месторождения глинистого сырья (лессы, суглинки и песчанистые глины) характеризуются низкой пластичностью, невысокой дисперсностью и узким интервалом спекания; аналогичные ограничения характерны для суглинистого сырья Центральной Азии [5].

Перспективным направлением преодоления данных технологических ограничений является модифицирование керамических масс высокоактивным бентонитовым сырьем, содержащим в основном минерал монтмориллонит [5, 6]. Благодаря слоистой структуре, высокой удельной поверхности и развитой емкости катионного обмена монтмориллонит существенно улучшает формовочные и пластические свойства масс [7, 8].

Бентонитовые глины Каракалпакстана и Центральных Кызылкумов рассматриваются как перспективное сырьё для теплоизоляционной керамики, лёгких керамических заполнителей и других материалов [9–11].

Исходя из вышеизложенного, в данной работе приведены результаты исследования химико-минералогического состава и структурных характеристик бентонитовой глины Ходжейлийского месторождения с целью её использования для получения стеновых керамических материалов.

Материалы и методы исследования

В качестве основного объекта исследования использовались образцы бентонитовой глины Ходжейлийского месторождения Республики Каракалпакстан, предварительно высушенные до постоянной массы при температуре 105–110 °C и измельчённые до прохождения через сито с размером ячеек 0,063 мм.

Химический состав пробы бентонита определяли методом классического силикатного анализа. Содержание SiO_2 определяли гравиметрическим методом выделения кремнекислоты. Количественное содержание оксидов Al_2O_3, Fe_2O_3, CaO и MgO определяли

титрованием раствором Трилона Б при соответствующих значениях pH и с применением специфических индикаторов. Содержание оксидов щелочных металлов (Na_2O, K_2O) устанавливали методом пламенной фотометрии. Потери при прокаливании (п.п.п.) определяли гравиметрически путем прокаливания навески в муфельной печи при температуре 950–1000 °C [12].

Минералогический состав определяли рентгенофазовым методом на дифрактометре SHIMADZU с использованием CuKα-излучения (λ = 1,54060 Å) при параметрах генератора 40 кВ и 30 мА [13–15]. Съёмку дифрактограмм проводили в диапазоне углов 2θ от 10° до 70° с шагом 0,05° и временем накопления 1,5 с на шаг. Расшифровку дифракционных пиков и идентификацию минеральных фаз осуществляли с помощью программного обеспечения HighScore Plus и международной базы данных ICDD PDF-2.

Структуру минералов бентонитовой глины, в частности монтмориллонита, изучали методом ИК-спектроскопии. ИК-спектры регистрировали на Фурье-спектрометре SHIMADZU FTIR (QATR-S) в интервале волновых чисел 4000–400 $см^{-1}$ с разрешением 4 $см^{-1}$ (число сканирований – 45) [16]. Обработку результатов выполняли с использованием стандартного программного обеспечения LabSolutions IR.

Результаты и обсуждение

Результаты химического анализа образца бентонитовой глины Ходжейлийского месторождения (ХБГ) приведены в табл. 1.

Таблица 1. Химический состав образца Ходжейлийской бентонитовой глины

Сырьё	Содержание оксидов, мас. %									п.п.п., мас. %
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	
ХБГ-1	58,2	17,8	6,82	0,93	0,76	1,91	<0,1	1,46	2,93	9,06
ХБГ-2	59,1	15,3	6,66	0,65	0,79	2,03	0,1	1,45	2,86	9,32
ХБГ-3	57,9	17,9	6,17	0,85	0,70	2,27	0,1	1,39	2,5	9,53
ХБГ (сред-нее)	58,4	17,0	6,55	0,81	0,75	2,07	0,1	1,43	2,76	9,30

Результаты анализа вещественного состава показывают, что данное сырьё относится к группе кислых алюмосиликатов с кремнезёмным модулем $M = SiO_2/Al_2O_3$ = 58,4/17,0 = 3,44. Высокое суммарное содержание щелочных и щелочноземельных оксидов ($K_2O + Na_2O$ = 4,19 мас. %; MgO = 2,07 мас. %; CaO = 0,75 мас. %) способствует снижению температуры образования расплава при обжиге и интенсификации процесса жидкостного спекания. Оксиды железа (Fe_2O_3 = 6,55 мас. %) обеспечивают окрашивание керамического черепка в равномерный красно-кирпичный цвет [17, 18]. Потери при прокаливании (п.п.п. = 9,30 мас. %) обусловлены удалением адсорбционной, межслойной и кристаллизационной воды.

Результаты исследования минералогического состава бентонитовой глины Ходжейлийского месторождения подтверждают её полиминеральный характер (рис. 1, табл. 2).

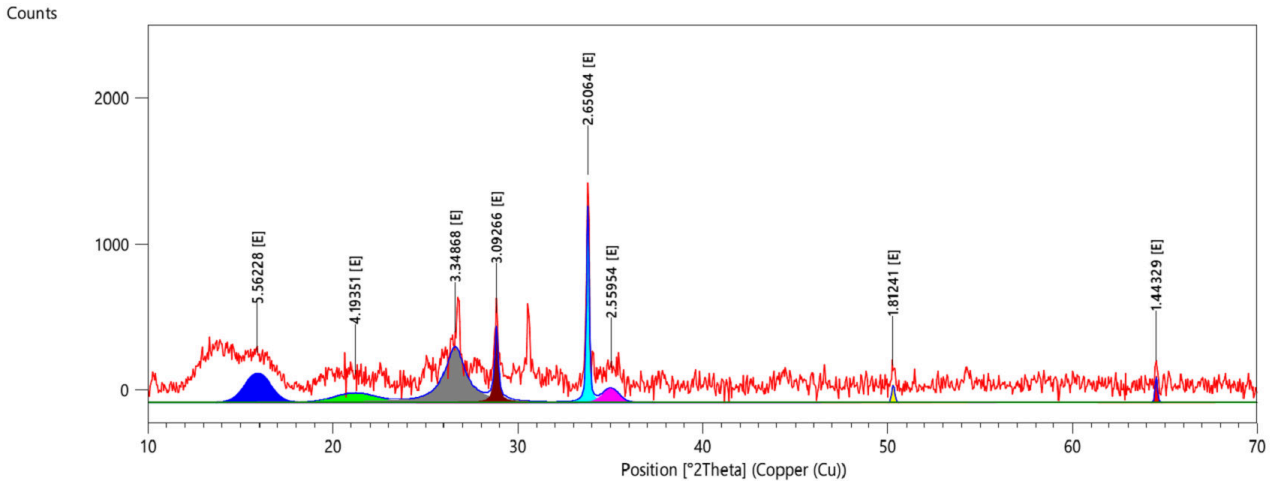


Рисунок 1. Рентгенограмма образца Ходжейлийской бентонитовой глины

Таблица 2. Результаты рентгенофазового анализа образца Ходжейлийского бентонита

Положение 2θ, град.	**Межплоскостное расстояние d, Å**	**Относительная интенсивность,%**	**Идентифицированная фаза**
13,80	6,41	19,61	Монтмориллонит / Смешанослойные фазы
15,92	5,56	14,05	Гидрослюда (Иллит)
21,20	4,19	4,30	α-Кварц (вторичный пик)
26,60	3,35	27,01	α-Кварц (основной пик)
28,85	3,09	35,55	Кальцит ($CaCO_3$) / Полевые шпаты
33,79	2,65	100,00	Монтмориллонит (базовый отражательный рефлекс)
35,03	2,56	6,83	Оксиды железа / Силикаты
50,30	1,81	8,55	Кварц / Полевошпатовые минералы
64,51	1,44	12,64	Слоистые силикаты

Главный (базовый) рефлекс с максимальной (100 %) интенсивностью при d = 2,65 Å (2θ = 33,79°) и рефлекс при d = 6,41 Å (2θ = 13,80°) указывают на то, что основной глинистой фазой образца является монтмориллонит [19]. Каркасную неглинистую часть составляют α-кварц (d = 3,35 Å) и примеси кальцита (d = 3,09 Å).

Инфракрасный спектр образца ходжейлийской бентонитовой глины в диапазоне 4000–400 $см^{-1}$ отражает характерные полосы поглощения слоистых алюмосиликатов (рис. 2, табл. 3).

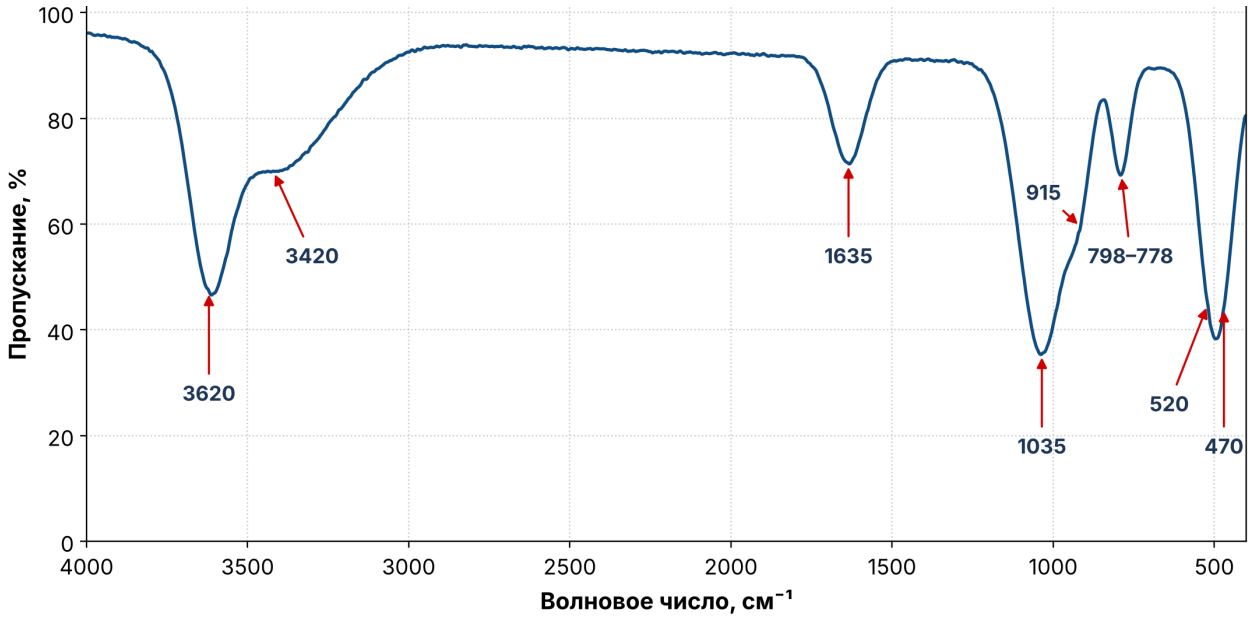


Рисунок 2. ИК-спектр образца Ходжейлийской бентонитовой глины

Таблица 3. Интерпретация полос поглощения ИК-спектра образца Ходжейлийского бентонита

Волновое число, $см^{-1}$	**Тип колебания / Функциональная группа**	**Минералогическая фаза**
3620	Валентные колебания: ν(Al–Al–OH)	Монтмориллонит (октаэдрический слой)
3420	Валентные колебания: ν(O–H) молекул H_2O	Адсорбированная и межслойная вода
1635	Деформационные колебания: δ(H–O–H)	Межслойная молекулярная вода
1035	Валентные колебания: $ν_{as}$(Si–O–Si)	Тетраэдрический кремнекислородный каркас
915	Деформационные колебания: δ(Al–Al–OH)	Ионы Al^{3+} в октаэдрических позициях
798 – 778	Дублет валентных колебаний: ν(Si–O)	Свободный α-кварц
520	Деформационные колебания: δ(Si–O–Al)	Связи тетраэдрических и октаэдрических слоев
470	Деформационные колебания: δ(Si–O–Si)	Тетраэдрическая сетка (Si–O–Si)

Интенсивная полоса поглощения при 1035 $см^{-1}$ и узкая полоса при 3620 $см^{-1}$ подтверждают преобладание монтмориллонитовой фазы. Наличие дублета в области 798–778 $см^{-1}$ свидетельствует о присутствии примеси тонкодисперсного кварца. Положения основных полос поглощения сопоставимы с литературными данными для природных бентонитов [20, 21].

Заключение

В результате комплексного исследования химико-минералогического состава и структурных характеристик бентонитовой глины Ходжейлийского месторождения Республики Каракалпакстан установлено, что данное сырьё представляет собой высокодисперсный материал монтмориллонит-кварцевого состава со значительным содержанием плавнеобразующих оксидов (K_2O + Na_2O = 4,19 мас. %; MgO = 2,07 мас. %).

Результаты ИК-спектроскопического исследования (характерные полосы 3620 и 1035 $см^{-1}$) и РФА (базовый рефлекс d = 2,65 Å со 100 % интенсивностью) подтверждают преобладание высокоактивной монтмориллонитовой фазы, что обеспечивает высокую связующую и пластифицирующую способность данного сырья.

Таким образом, результаты проведённых исследований показали перспективность использования бентонитовой глины Ходжейлийского месторождения в качестве сырья для получения стеновых керамических материалов, расширяющего сырьевую базу силикатных материалов Республики Каракалпакстан [22].

Список литературы

1. Mesrar, H. Physicochemical and Mechanical Characterization of Ceramic Materials from Meknes Region (Morocco) / H. Mesrar, L. Mesrar, R. Jabrane // Journal of Ecological Engineering. – 2023. – T. 24, № 8. – P. 183–197. – DOI: 10.12911/22998993/166393.
2. Flores Nicolás, M. Low-temperature sintering of ceramic bricks from clay, waste glass and sand / M. Flores Nicolás, M.M. Chávez, M. Vlasova, T. Pi Puig // Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. – 2024. – T. 63, № 5. – P. 377–388. – DOI: 10.1016/j.bsecv.2024.06.003.
3. О мерах по ускоренному развитию промышленности строительных материалов: Постановление Президента Республики Узбекистан № ПП-4335 от 23 мая 2019 г. – Ташкент: Национальная база данных законодательства, 2019. – 5 с.
4. О дополнительных мерах по развитию промышленности строительных материалов: Постановление Президента Республики Узбекистан № ПП-5130 от 9 июня 2021 г. – Ташкент: Национальная база данных законодательства, 2021. – 6 с.
5. Nurlybayev, R.E. An Investigation of the Effects of Additives and Burning Temperature on the Properties of Products Based on Loam / R.E. Nurlybayev, M.T. Zhuginissov, Zh.O. Zhumadilova, A.A. Joldassov, Ye.S. Orynbekov, A.A. Murzagulova // Applied Sciences. – 2022. – T. 12, № 7. – Art. 3352. – DOI: 10.3390/app12073352.
6. Zhuginissov, M.T. The Influence of the Burning Environment on the Properties of Ceramic Products Based on Fusible Raw Materials / M.T. Zhuginissov, R.E. Nurlybayev, Ye.S. Orynbekov, Zh.O. Zhumadilova, Ye.Ye. Khamza, M.Z. Bulenbayev // Ceramics. – 2023. – T. 6, № 2. – P. 872–885. – DOI: 10.3390/ceramics6020050.
7. Юсупов, А.Р. Физико-химические основы модифицирования глинистого сырья Узбекистана / А.Р. Юсупов, З.Р. Кадырова. – Ташкент: Фан, 2020. – 214 с.
8. Kalendova, A. Applications of Clays in Nanocomposites and Ceramics / A. Kalendova, J. Kupkova, M. Urbaskova, D. Merinska // Minerals. – 2024. – T. 14, № 1. – DOI: 10.3390/min14010093.
9. Kadyrova, Z.R. Karakalpakstan Bentonite Clays – Perspective Raw Materials for Obtaining Ceramic Heat-Insulating Materials / Z.R. Kadyrova, A.P. Purkhanatdinov, Sh.M. Niyazova // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering. – 2020. – T. 9, № 8. – P. 417–420. – DOI: 10.35940/ijitee.F3821.069820.

10. Турганбаев, Б.Б. Перспективность использования бентонита в производстве лёгких керамических заполнителей / Б.Б. Турганбаев, З.Р. Кадырова, А.П. Пурханатдинов, Б.А. Калбаев // Universum: технические науки. – 2025. – № 7 (136).
11. Zakirov, M. Bentonite clays of the Central Kyzylkum and their material composition and engineering and geological properties, Uzbekistan / M. Zakirov, I. Agzamova, N. Normatova, D. Begimkulov, G. Ochilov, M. Juliev // E3S Web of Conferences. – 2023. – T. 386. – Art. 01006. – DOI: 10.1051/e3sconf/202338601006.
12. Методы испытаний глинистого сырья для производства керамических материалов: ПИИ СНБ. – Ташкент: Узбекистан, 2018. – 80 с.
13. Klug, H.P. X-Ray Diffraction Procedures: For Polycrystalline and Amorphous Materials / H.P. Klug, L.E. Alexander. – 2nd ed. – New York: Wiley-Interscience, 1974. – 992 P.
14. Ali, A. X-ray Diffraction Techniques for Mineral Characterization: A Review for Engineers of the Fundamentals, Applications, and Research Directions / A. Ali, Y.W. Chiang, R.M. Santos // Minerals. – 2022. – T. 12, № 2. – Art. 205. – DOI: 10.3390/min12020205.
15. Cuevas, J. Bentonite Powder XRD Quantitative Analysis Using Rietveld Refinement: Revisiting and Updating Bulk Semiquantitative Mineralogical Compositions / J. Cuevas, M.Á. Cabrera, C. Fernández, C. Mota-Heredia, R. Fernández, E. Torres, M.J. Turrero, A.I. Ruiz // Minerals. – 2022. – T. 12, № 6. – Art. 772. – DOI: 10.3390/min12060772.
16. Fernández-Carrasco, L. Infrared Spectroscopy in the Analysis of Building Materials / L. Fernández-Carrasco, D. Torrens-Martín, L.M. Morales, S. Martínez-Ramírez Rijeka: InTech, 2012. – P. 369–382. – DOI: 10.5772/36186.
17. Салахов, А.М. Оптимизация структуры стеновой керамики / А.М. Салахов. – Казань: Издательство КГТУ, 2010. – 180 с.
18. Крупа, А.А. Химическая технология керамики / А.А. Крупа, В.С. Городов. – Киев: Вища школа, 1990. – 320 с.
19. Grim, R.E. Applied Clay Mineralogy / R.E. Grim. – New York: McGraw-Hill, 1962. – 422 P.
20. Olegario, E.M. Characterization of Philippine natural bentonite / E.M. Olegario, M.B.Z. Gili // Experimental Results. – 2021. – T. 2. – DOI: 10.1017/exp.2021.16.
21. El Ghoubali, N. Unlocking the energy potential of Moroccan bentonite clay: structural, optical, and thermal insights for advanced applications / N. El Ghoubali, A. Maaroufi, A. El Hamidi, A. El Amarani [et al.] // Discover Applied Sciences. – 2025. – T. 7, № 8. – Art. 887. – DOI: 10.1007/s42452-025-06917-2.
22. Мухамеджанова, М.А. Минералогический состав и технология керамических изделий на основе местных бентонитов / М.А. Мухамеджанова // Строительные материалы и технологии. – 2022. – № 4. – С. 45–50.

References

1. Mesrar, H. Physicochemical and Mechanical Characterization of Ceramic Materials from Meknes Region (Morocco) / H. Mesrar, L. Mesrar, R. Jabrane // Journal of Ecological Engineering. – 2023. – Vol. 24, No. 8. – P. 183–197. – DOI: 10.12911/22998993/166393.

2. Flores Nicolás, M. Low-temperature sintering of ceramic bricks from clay, waste glass and sand / M. Flores Nicolás, M.M. Chávez, M. Vlasova, T. Pi Puig // Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. – 2024. – Vol. 63, No. 5. – P. 377–388. – DOI: 10.1016/j.bsecv.2024.06.003.
3. [On the Measures for the Accelerated Development of the Building Materials Industry: Resolution of the President of the Republic of Uzbekistan No. PP-4335 of May 23, 2019]. – Tashkent: Natsional'naya baza dannykh zakonodatel'stva, 2019. – 5 s (In Russ.).
4. [On Additional Measures for the Development of the Building Materials Industry: Resolution of the President of the Republic of Uzbekistan No. PP-5130 of June 9, 2021]. – Tashkent: Natsional'naya baza dannykh zakonodatel'stva, 2021. – 6 s (In Russ.).
5. Nurlybayev, R.E. An Investigation of the Effects of Additives and Burning Temperature on the Properties of Products Based on Loam / R.E. Nurlybayev, M.T. Zhuginissov, Zh.O. Zhumadilova, A.A. Joldassov, Ye.S. Orynbekov, A.A. Murzagulova // Applied Sciences. – 2022. – Vol. 12, No. 7. – Art. 3352. – DOI: 10.3390/app12073352.
6. Zhuginissov, M.T. The Influence of the Burning Environment on the Properties of Ceramic Products Based on Fusible Raw Materials / M.T. Zhuginissov, R.E. Nurlybayev, Ye.S. Orynbekov, Zh.O. Zhumadilova, Ye.Ye. Khamza, M.Z. Bulenbayev // Ceramics. – 2023. – Vol. 6, No. 2. – P. 872–885. – DOI: 10.3390/ceramics6020050.
7. Yusupov, A.R. [Physicochemical Foundations of Modifying Clay Raw Materials of Uzbekistan] / A.R. Yusupov, Z.R. Kadyrova. – Tashkent: Fan, 2020. – 214 P. (In Russ.).
8. Kalendova, A. Applications of Clays in Nanocomposites and Ceramics / A. Kalendova, J. Kupkova, M. Urbaskova, D. Merinska // Minerals. – 2024. – Vol. 14, No. 1. – DOI: 10.3390/min14010093.
9. Kadyrova, Z.R. Karakalpakstan Bentonite Clays – Perspective Raw Materials for Obtaining Ceramic Heat-Insulating Materials / Z.R. Kadyrova, A.P. Purkhanatdinov, Sh.M. Niyazova // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering. – 2020. – Vol. 9, No. 8. – P. 417–420. – DOI: 10.35940/ijitee.F3821.069820.
10. Turganbaev, B.B. [Prospects for the use of bentonite in the production of lightweight ceramic aggregates] / B.B. Turganbaev, Z.R. Kadyrova, A.P. Purkhanatdinov, B.A. Kalbaev // Universum: Technical Sciences. – 2025. – No. 7 (136).
11. Zakirov, M. Bentonite clays of the Central Kyzylkum and their material composition and engineering and geological properties, Uzbekistan / M. Zakirov, I. Agzamova, N. Normatova, D. Begimkulov, G. Ochilov, M. Juliev // E3S Web of Conferences. – 2023. – Vol. 386. – Art. 01006. – DOI: 10.1051/e3sconf/202338601006.
12. [Test Methods for Clay Raw Materials for the Production of Ceramic Materials: PII SNB]. – Tashkent: Uzbekistan, 2018. – 80 s (In Russ.).
13. Klug, H.P. X-Ray Diffraction Procedures: For Polycrystalline and Amorphous Materials / H.P. Klug, L.E. Alexander. – 2nd ed. – New York: Wiley-Interscience, 1974. – 992 P.
14. Ali, A. X-ray Diffraction Techniques for Mineral Characterization: A Review for Engineers of the Fundamentals, Applications, and Research Directions / A. Ali, Y.W. Chiang, R.M. Santos // Minerals. – 2022. – Vol. 12, No. 2. – Art. 205. – DOI: 10.3390/min12020205.

15. Cuevas, J. Bentonite Powder XRD Quantitative Analysis Using Rietveld Refinement: Revisiting and Updating Bulk Semiquantitative Mineralogical Compositions / J. Cuevas, M.Á. Cabrera, C. Fernández, C. Mota-Heredia, R. Fernández, E. Torres, M.J. Turrero, A.I. Ruiz // Minerals. – 2022. – Vol. 12, No. 6. – Art. 772. – DOI: 10.3390/min12060772.
16. Fernández-Carrasco, L. Infrared Spectroscopy in the Analysis of Building Materials / L. Fernández-Carrasco, D. Torrens-Martín, L.M. Morales, S. Martínez-Ramírez Rijeka: InTech, 2012. – P. 369–382. – DOI: 10.5772/36186.
17. Salakhov, A.M. [Optimization of the Structure of Wall Ceramics] / A.M. Salakhov. – Kazan': Izdatel'stvo KGTU, 2010. – 180 s (In Russ.).
18. Krupa, A.A. [Chemical Technology of Ceramics] / A.A. Krupa, V.S. Gorodov. – Kiev: Vishcha shkola, 1990. – 320 s (In Russ.).
19. Grim, R.E. Applied Clay Mineralogy / R.E. Grim. – New York: McGraw-Hill, 1962. – 422 P.
20. Olegario, E.M. Characterization of Philippine natural bentonite / E.M. Olegario, M.B.Z. Gili // Experimental Results. – 2021. – Vol. 2. – DOI: 10.1017/exp.2021.16.
21. El Ghoubali, N. Unlocking the energy potential of Moroccan bentonite clay: structural, optical, and thermal insights for advanced applications / N. El Ghoubali, A. Maaroufi, A. El Hamidi, A. El Amarani [et al.] // Discover Applied Sciences. – 2025. – Vol. 7, No. 8. – Art. 887. – DOI: 10.1007/s42452-025-06917-2.
22. Mukhamedjanova, M.A. [Mineralogical Composition and Technology of Ceramic Products Based on Local Bentonites] / M.A. Mukhamedjanova // Stroitel'nye materialy i tekhnologii. – 2022. – No. 4. – P. 45–50. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию: 23.06.2026
Статья принята к публикации: 31.10.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 666.968: 552.323.5

Исследование процессов обогащения базальтов методом механической очистки от шламов

Камолов Бўри Сирожович
соискатель
Каршинский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Карши
E-mail: kamolov.b.s@mail.ru

Investigation of basalt beneficiation processes via mechanical removal of slimes

Kamolov Buri Sirozhovich
Applicant, Karshi state technical university, Karshi, Republic of Uzbekistan

Аннотация

Работа посвящена решению актуальной научно-практической задачи повышения качества базальтового сырья месторождений «Гавасай», «Асмансай» и «Айдаркуль» (Республика Узбекистан) путем предварительной механической очистки от поверхностных шламов, глинистых прослоек и экзогенных солевых отложений. Целью исследования является обоснование эффективности механического обогащения дробленого базальта во вращающемся барабане-бутаре и оценка влияния отмывки поверхностных примесей на снижение коррозионного износа оборудования и увеличение срока службы базальтовой теплоизоляционной ваты. Методология исследования включает двухстадийную подготовку породы (щековое дробление до фракции 5–6 мм с последующей гидродинамической промывкой в бутаре), физико-химический и гидрохимический анализ водных проб (определение pH, сухого остатка, концентрации катионов Ca2+, Mg2+, Na+ + K+ и анионов SO42-, Cl- методом титрования и фотометрии), а также долгосрочный (12-летний) промышленный мониторинг коррозионной стойкости защищаемых трубопроводов. Экспериментально доказано, что промывка позволяет удалить от 0,5 % до 1,0 % масс. вредных шламовых примесей, при этом прирост сухого остатка в оборотной воде достигает 185,7–218,2 мг/л. Установлено, что удаление солевых вредностей предотвращает электрохимическую коррозию: применение очищенного базальта увеличивает срок службы теплоизолированных трубопроводов в 2–2,5 раза (с 2–8 до 12–15 лет), а рабочих органов плавильного оборудования — в 3,5 раза.

Библиографическое описание: Камолов Б.С. Исследование процессов обогащения базальтов методом механической очистки от шламов // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23660

Abstract

The study is devoted to solving the urgent scientific and practical problem of improving the quality of basalt raw materials from the Gavasay, Asmansay, and Aydarkul deposits (Republic of Uzbekistan) by preliminary mechanical cleaning from surface slimes, clay layers, and exogenous salt deposits. The aim of the work is to substantiate the efficiency of mechanical beneficiation of crushed basalt in a rotary drum washer (trommel) and to evaluate the effect of washing surface impurities on reducing corrosive wear of processing equipment and extending the service life of basalt thermal insulation wool. The research methodology includes a two-stage rock preparation (jaw crushing to a fraction of 5–6 mm followed by hydrodynamic washing in a trommel), physicochemical and hydrochemical analysis of water samples (determination of pH, total dissolved solids, concentration of cations Ca2+, Mg2+, Na+ + K+ and anions SO42-, Cl- using titration and photometry methods), as well as a long-term (12-year) industrial monitoring of the corrosion resistance of protected pipelines. It has been experimentally proven that washing removes from 0.5 % to 1.0 % wt. of harmful slime impurities, while the increase in total dissolved solids (TDS) in recirculating water reaches 185.7–218.2 mg/L. It was established that the removal of salt impurities prevents electrochemical corrosion: the use of purified basalt extends the service life of insulated pipelines by 2 to 2.5 times (from 2–8 to 12–15 years) and the working components of melting equipment by an average of 3.5 times.

Ключевые слова: базальт, обогащение сырья, механическая очистка, шламы, промывка, барабан-бутара, сухой остаток, гидрохимический анализ, коррозионная стойкость, базальтовая вата, месторождения Узбекистана.

Keywords: basalt, raw material beneficiation, mechanical cleaning, slimes, washing, trommel washer, dry residue, hydrochemical analysis, corrosion resistance, basalt wool, deposits of Uzbekistan.

Введение

Базальтовые породы благодаря своей высокой химической стойкости, термической стабильности и механической прочности являются ценным сырьем для производства широкого спектра промышленной продукции, в частности непрерывного волокна, теплоизоляционных и кислотоупорных материалов. Однако природный базальтовый камень в силу естественной пористости и экзогенных геологических процессов подвержен поверхностным загрязнениям. На поверхности отдельных кусков базальта часто концентрируются растворимые соли (NaCl, KCl, $CaCl_2$, CaO), глинистые прослойки, шлам и грязь.

В настоящее время на базальто перерабатывающих предприятиях очистке сырья уделяется недостаточное внимание из-за ошибочного мнения, что при температурах плавления (1300–1400 °C) все поверхностные примеси полностью выгорают или удаляются в атмосферу. На практике наличие шламов и хлоридных солей в плаве приводит к ухудшению качества базальтового волокна и ускоряет коррозионный износ как

технологического оборудования, так и защищаемых базальтовой ватой металлических трубопроводов. В связи с этим актуальной задачей является исследование эффективности предварительного обогащения и промывки базальтовых пород до стадии их плавления.

Материалы и методы

Объектами исследования выступали базальтовые породы трех крупных месторождений Узбекистана: «Гавасай», «Асмансай» и «Айдаркуль». Технологическая схема эксперимента включала следующие этапы:

1. Дробление: Исходная базальтовая порода крупностью 250–300 мм подвергалась первой стадии измельчения на щековой дробилке до фракции –40 мм (преимущественно 5–6 мм). Выбор щекового дробления для твердых базальтов (3000–5000 kgN/sm^3) позволяет селективно отделять более твердые фракции от менее прочных сопутствующих минералов.

2. Механическая очистка (Промывка): Дробленый материал подавался в специализированную промывочную машину — бутару, которая после дезинтеграции была адаптирована под грохочение. Решетчатая стенка бутары выполняла роль сита. Под воздействием вращательного движения барабана, внутренних уголков и кольцевых порогов происходило интенсивное встряхивание кусков породы. Подача воды внутрь барабана способствовала разрыхлению и смыву шламов.

3. Сушка и Плавление: Промытые образцы высушивались, после чего направлялись на плавление для получения базальтовой теплоизоляционной ваты.

Для проверки эффективности очистки исследовались пробы массой по 200 кг (для оценки выхода шлама) и по 100 кг (для оценки коррозионной стойкости изделий). Качество промывки контролировалось путем измерения изменения массы сухой породы, а также методом химического и гидрохимического анализа состава оборотной воды (определение концентраций катионов Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}+K^{+}, NH_4^{+}, Fe^{3+} и анионов CO_3^{2-}, HCO_3^{-}, SO_4^{2-}, Cl^{-}, NO_2^{-}, NO_3^{-}, величины сухого остатка и pH) до и после промывки.

Для оценки влияния очистки сырья на долговечность готовой продукции был поставлен долгосрочный (12 лет) эксперимент: полученная из очищенного и неочищенного базальта вата монтировалась на трубопроводы промышленных предприятий г. Навои.

Результаты

На первом этапе были определены показатели механической очистки базальтов от шлама для навесок массой 200 кг (табл. 1)

Таблица 1. Показатели механической очистки базальтов исследуемых месторождений

№	Наименование показателей	Гавасай	Асмансай	Айдаркуль
1	Масса исходного образца базальта, кг	200,0	200,0	200,0
2	Масса базальтов крупностью 5–6 мм после дробления, кг	199,5	199,5	199,0
3	Масса базальтов после промывки и сушки, кг	199,0	198,5	198,0

№	Наименование показателей	Гавасай	Асмансай	Айдаркуль
4	Масса удаленных примесей (шламов), % от исходного	0,5	0,75	1,0

Эксперимент показал, что в среднем масса выделенных примесей составляет от 0,5 % до 1,0 % от общей массы сырья. При этом зафиксировано, что масса выделяемых шламов напрямую увеличивается с повышением степени засоленности почвы в районе залегания месторождения.

Результаты влияния механической очистки на коррозионную стойкость металлоконструкций и технологического оборудования в течение 12-летнего периода мониторинга приведены в таблице 2.

Время начала коррозии металлов при использовании базальтовой ваты

Таблица 2. Для детального понимания процессов вымывания солей был проведен полный гидрохимический анализ водных проб до и после технологического цикла промывки (табл. 3)

№	Наименование показателей	«Гавасай»	«Асмансай»	«Айдаркуль»
1	Степень засоленности почвы месторождения, %	28,0	85,4	92,9
2	Время появления коррозии на трубах (базальт без промывки), лет	6–8	5–6	2–4
3	Время появления коррозии на трубах (базальт после промывки), лет	15	12	12
4	Время появления коррозии на рабочих органах оборудования, лет	12	12	12

Таблица 3. Результаты анализа водных проб (соотношение базальт/вода = 10 кг / 25 л)

№	Место отбора и состояние пробы	pH	Сухой остаток, мг/л	Ca^{2+} (% мг-экв)	Mg^{2+} (% мг-экв)	$Na^{+}+K^{+}$ (% мг-экв)	Cl^{-} (% мг-экв)	SO_4^{2-} (% мг-экв)	Взвеси, мг/л
1	**Базальт Гавасая**								
	- до промывки	7,57	930	43,11	37,18	17,46	11,21	46,22	13,4
	- после промывки	8,01	1127,4	41,44	34,54	23,87	13,81	44,39	29,8
2	**Базальт Асмансая**								
	- до промывки	7,67	1133,6	33,09	43,8	22,18	9,14	34,68	21,16
	- после промывки	8,22	1351,8	37,67	34,31	28,02	10,43	44,68	31,4
3	**Базальт Айдаркуля**								
	- до промывки	7,84	1233,6	38,67	31,31	29,76	11,87	44,45	24,2
	- после промывки	8,42	1419,3	36,55	31,54	31,01	10,51	44,27	36,15

Анализ оборотной воды показал существенный рост сухого остатка после отмывки базальтов: для Гавасая — на 197,4 мг/л, для Асмансая — на 218,2 мг/л, для Айдаркуля — на 185,7 мг/л. Также зафиксировано увеличение концентрации взвешенных веществ и ионов щелочных металлов ($Na^{+}+K^{+}$).

Обсуждение

Полученные данные свидетельствуют о высокой эффективности механического метода обогащения базальтовых пород. Прирост сухого остатка в промывочной воде и изменение содержания катионов и анионов (в частности, рост концентрации хлоридов и сульфатов щелочных металлов после промывки) напрямую подтверждают, что вредные экзогенные соли переходят с поверхности базальта в водную среду. Наибольшие показатели сухого остатка зафиксированы у базальтов месторождений «Асмансай» (1351,8 мг/л) и «Айдаркуль» (1419,3 мг/л), что коррелирует с высокой природной засоленностью почв данных регионов (85,4 % и 92,9 % соответственно).

Важнейшим прикладным результатом работы является двукратное увеличение срока службы теплоизоляционных покрытий (до появления признаков коррозии под ватой на трубах) при переходе на очищенное сырье. Для наименее засоленного Гавасайского базальта срок службы увеличился с 6–8 лет до 15 лет, а для высокозасоленных Асмансайского и Айдаркульского базальтов — с 2–5 лет до 12 лет. Это объясняется тем, что удаление хлорид- и сульфат-ионов на стадии промывки исключает их последующее попадание в структуру готовой базальтовой ваты, где они при контакте с влагой воздуха действовали бы как активные стимуляторы электрохимической коррозии металлов.

Что касается альтернативных методов очистки, например химических реагентов или кислотного растворения, то в ходе анализа литературных источников и специфики производства было установлено, что их применение экономически нецелесообразно ввиду высокой стоимости реагентов и сложности утилизации кислых стоков. За счет высокой природной плотности и низкой пористости внутренней структуры плагиоклазов базальта вредные примеси локализуются исключительно на поверхности кусков, что делает простую механическую промывку в бутаре наиболее рациональным технологическим решением.

Заключение

1. Установлено, что поверхностные шламовые и солевые загрязнения базальтов негативно влияют на качество готовой продукции и ускоряют коррозию оборудования. Степень загрязнения сырья напрямую зависит от засоленности почв месторождений (наибольшая загрязненность выявлена у базальта Айдаркуля и Асмансая).

2. Разработана и экспериментально обоснована технологически простая схема механического обогащения базальтовой породы фракции –40 мм методом водной промывки в специализированном вращающемся барабане-бутаре. Метод позволяет эффективно удалять до 1,0 % поверхностных шламовых примесей.

3. Гидрохимическим анализом доказан активный переход сульфатных, хлоридных солей и взвешенных веществ в жидкую фазу, о чем свидетельствует рост сухого остатка промывочной воды на 185–218 мг/л.

4. Промышленные испытания показали, что предварительное обесшламливание базальта позволяет продлить срок безаварийной эксплуатации изолируемых трубопроводов в 2–2,5 раза, а рабочих органов плавильного и перерабатывающего оборудования — в среднем в 3,5 раза.

Список литературы

1. А.А. Курбанов, Б.У. Рахматов, Б.С. Камолов, Х.Б. Рахматов. Сравнительный анализ физико-химических свойств базальтовых пород для выбора критерий при выпуске разнообразной продукции // ҚарДУ хабарлари (Вестник КарГУ). – 2019. – № 4. – С. 78–83.
2. Б.С. Камолов, А.А. Курбанов, Л.К. Сатторов, Р.К. Рашидова. Особенности фильтрации базальтовым фильтром промышленных газов от пыли // Innovatsion texnologiyalar. – 2023. – № 1 (49). – С. 38–43.
3. Джигарис, Д.Д. Основы производства базальтовых волокон и изделий / Д.Д. Джигарис, М.Ф. Махова. – Москва: Теплоэнергетик, 2006. – 410 с.
4. Камолов, Б.С. Ультразвуковая обработка пород / Б.С. Камолов, А.А. Курбанов, Ю.В. Исоков // O'zbekistonda fanlararo innovatsiyalar va ilmiy tadqiqotlar jurnali. – 2023. – Т. 2, № 19. – С. 508–511.
5. Камолов, Б.С. О распространении сырьевых запасов базальтов по Узбекистану / Б.С. Камолов // Journal of Innovations in Scientific and Educational Research. – 2023. – Т. 6, № 10. – С. 126–132.
6. Курбанов, А.А. Разработка эффективной технологии переработки разнотипных базальтов Узбекистана: автореф. дис. … докт. техн. наук: 02.00.13. – 2016. – 43 с.
7. Курбанов, А.А. Специфические особенности базальтов Кызылкума: монография / А.А. Курбанов. – Ташкент: Фан, 2009. – 160 с.
8. Пуртов, В.К. Высокотемпературный метасоматоз и гранитизация пород базальтового состава в хлоридных растворах / В.К. Пуртов; Ин-т минералогии УрО РАН. – Миасс: УрО РАН, 2002. – 140 с.
9. Сырьё для производства минерального волокна: Государственный баланс запасов полезных ископаемых Республики Узбекистан. – Ташкент: Госкомгеологии РУз, 2010. – 15 с.
10. Шевченко, В.П. Получение и исследование свойств базальтового волокна на основе природного сырья Узбекистана / В.П. Шевченко, Д.Д. Гуламова // Химия и химическая технология. – 2011. – № 2. – С. 10–12.
11. A. Kurbonov, L. Sattorov, B. Kamolov, O. Rakhimov. Chemical and mineralogical studies of basalt “Aydarkul” // BIO Web of Conferences. – 2023. – Т. 71. – Art. 02040. – DOI: 10.1051/bioconf/20237102040.
12. B.S. Kamolov, A.A. Kurbanov, L.K. Sattorov. Features of filtration of industrial gases from dust with a basalt filter // E3S Web of Conferences: International Scientific Conference on «Construction Mechanics, Modern Materials and Practical Tasks» (CMMMPT. – 2023. – Т. 411. – Art. 01036. – DOI: 10.1051/e3sconf/202341101036.

References

1. Kurbanov, B.U., Rakhmatov, B.S., Kamolov, Kh. B. Rakhmatov. [Comparative analysis of the physicochemical properties of basalt rocks for selecting criteria in the production of various products] // QarDU khabarlari (Vestnik KarGU). – 2019. – No. 4. (In Russ.).
2. [Kamolov, A.A., Kurbanov, L.K., Sattorov, R.K., Rashidova. Peculiarities of filtration of industrial gases from dust by a basalt filter] // Innovatsion texnologiyalar. – 2023. – No. 1 (49). (In Russ.).
3. Dzhigaris D.D. [Fundamentals of the production of basalt fibers and products] / D.D. Dzhigaris, M.F. Makhova. – Moskva: Teploenergetik, 2006. – 410 s (In Russ.).
4. Kamolov B.S., Kurbanov A.A., Isokov Yu.V. [Ultrasonic treatment of rocks] // O'zbekistonda fanlararo innovatsiyalar va ilmiy tadqiqotlar jurnali. – 2023. – Vol. 2, No. 19. (In Russ.).
5. Kamolov B.S. [On the distribution of basalt raw material reserves in Uzbekistan] // Journal of Innovations in Scientific and Educational Research. – 2023. – Vol. 6, No. 10. (In Russ.).
6. Kurbanov A.A. [Development of an effective technology for processing various types of basalts of Uzbekistan: author's abstract of dissertation. Doctor of Technical Sciences: 02.00.13]. – 43 s. – 2016. (In Russ.).
7. Kurbanov A.A. [Specific features of Kyzylkum basalts: monograph]. – Tashkent: Fan, 2009. – 160 s (In Russ.).
8. Purtov V.K. [High-temperature metasomatism and granitization of rocks of basaltic composition in chloride solutions] / V.K. Purtov; In-t mineralogii UrO RAN. – Miass: UrO RAN, 2002. – 140 s (In Russ.).
9. [Raw materials for the production of mineral fiber: State balance of mineral reserves of the Republic of Uzbekistan]. – Tashkent: Goskomgeologii RUz, 2010. – 15 s (In Russ.).
10. Shevchenko V.P., Gulamova D.D. [Production and investigation of the properties of basalt fiber based on natural raw materials of Uzbekistan] // Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya. – 2011. – No. 2. (In Russ.).
11. A. Kurbonov, L. Sattorov, B. Kamolov, O. Rakhimov. Chemical and mineralogical studies of basalt “Aydarkul” // BIO Web of Conferences. – 2023. – Vol. 71. – Art. 02040. – DOI: 10.1051/bioconf/20237102040.
12. B.S. Kamolov, A.A. Kurbanov, L.K. Sattorov. Features of filtration of industrial gases from dust with a basalt filter // E3S Web of Conferences: International Scientific Conference on «Construction Mechanics, Modern Materials and Practical Tasks» (CMMMPT. – 2023. – Vol. 411. – Art. 01036. – DOI: 10.1051/e3sconf/202341101036.

Статья поступила в редакцию: 10.11.2026
Статья принята к публикации: 18.11.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 544.723.212:547.97

DOI: 10.32743/UniTech.2026.152.11.23753

Адсорбция красителя метиленового голубого магнитным углеродным сорбентом, полученным методом одностадийного синтеза из лузги подсолнечника

Карабаева Муслима Ифтихоровна
докторант
Международный институт пищевых технологий и инженерии
Республика Узбекистан, г. Фергана
E-mail: muslimaxon1990@mail.ru
Салиханова Дилноза Саидакбаровна
проф.
Институт общей и неорганической химии
Академия наук Республики
Узбекистан; Республика Узбекистан, г. Ташкент
Мирсалимова Саодат Рахматжановна
проф.
Ферганский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Фергана
Махмудова Гулбахор
лаборант, Ферганский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Фергана

Adsorption of methylene blue dye by a magnetic carbon sorbent prepared via a one-step synthesis from sunflower husks

Karabaeva Muslima Iftikhorovna
Doctoral Student
International Institute of Food Technology and Engineering
Uzbekistan, Fergana
Salikhanova Dilnoza Saidakbarovna
professor
Institute of General and Inorganic Chemistry of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan; Uzbekistan, Tashkent
Mirsalimova Saodat Rakhmatzhanovna
professor
Fergana State Technical University
Uzbekistan, Fergana

Библиографическое описание: Адсорбция красителя метиленового голубого магнитным углеродным сорбентом, полученным методом одностадийного синтеза из лузги подсолнечника // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Карабаева М.И. [и др.]. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23753

Makhmudova Gulbakhor
Laboratory Assistant
Fergana State Technical University
Uzbekistan, Fergana

Аннотация

В статье подробно исследован процесс адсорбции катионного органического красителя метиленового голубого из водных растворов новым магнитным углеродным сорбентом, полученным методом одностадийного синтеза из доступного растительного сырья, лузги подсолнечника, с использованием хлоридов цинка и железа. Актуальность работы обусловлена необходимостью создания недорогих и технологичных сорбционных материалов для эффективной очистки окрашенных промышленных сточных вод. В ходе исследований методом дрейфа pH определена точка нулевого заряда поверхности синтезированного материала, характеризующая его кислотно-основные свойства и механизм электростатического взаимодействия с катионами красителя. В серии опытов в периодическом режиме детально изучено влияние основных технологических факторов, включая дозировку сорбента, продолжительность контакта фаз и начальную концентрацию красителя, на остаточное содержание и эффективность очистки раствора. Для обеспечения высокой достоверности, точности и воспроизводимости получаемых данных все экспериментальные измерения и спектрофотометрические анализы проводились в трёхкратной повторности. Установлено, что полученный сорбент обеспечивает высокую степень извлечения метиленового голубого и обладает выраженными магнитными свойствами, позволяющими быстро и полностью отделять отработанный материал от очищенной водной фазы воздействием внешнего магнитного поля без применения энергозатратных стадий фильтрации или центрифугирования.

Abstract

This paper presents a comprehensive investigation into the adsorption of the cationic organic dye methylene blue from aqueous solutions using a novel magnetic carbon sorbent obtained via single-step synthesis from an available agricultural precursor, sunflower husks, with zinc and iron chlorides. The relevance of this work is driven by the need to develop low-cost and technologically efficient sorption materials for the effective treatment of colored industrial wastewater. During the study, the point of zero charge of the synthesized material surface was determined by the pH drift method, characterizing its acid-base properties and the mechanism of electrostatic interaction with dye cations. In a series of batch experiments, the effects of key process parameters—including sorbent dosage, phase contact time, and initial dye concentration—on residual dye content and solution purification efficiency were studied in detail. To ensure high reliability, accuracy, and reproducibility of the obtained data, all experimental measurements and spectrophotometric analyses were performed in triplicate. The results demonstrate that the synthesized sorbent provides a high removal efficiency for methylene blue and exhibits pronounced magnetic properties, enabling rapid and complete separation of the spent material from the treated aqueous phase using an external magnetic field without energy-intensive filtration or centrifugation stages.

Ключевые слова: магнитный углеродный сорбент, лузга подсолнечника, одностадийный синтез, адсорбция, метиленовый голубой, точка нулевого заряда, магнитная сепарация.

Keywords: magnetic carbon sorbent, sunflower husks, single-step synthesis, adsorption, methylene blue, point of zero charge, magnetic separation.

Финансирование: Данное исследование было проведено в рамках проекта «Академическая мобильность» (№ AK-26-1-306), реализуемого при поддержке Агентства инновационного развития Республики Узбекистан.

Funding: This research was conducted as part of the «Academic Mobility» project (No. AK-26-1-306), implemented with the support of the Agency for Innovative Development of the Republic of Uzbekistan.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии каких-либо известных финансовых интересов или личных отношений, которые могли бы быть восприняты как факторы, повлиявшие на результаты работы, представленные в данной статье.

Conflict of interest: The authors declare that they have no known financial interests or personal relationships that could be perceived as having influenced the results presented in this article.

Введение

Синтетические красители, сбрасываемые с неочищенными стоками текстильных производств, наносят значительный ущерб водным экосистемам [4, 14]. Метиленовый голубой (МГ) относится к катионным красителям, которые даже в малых концентрациях нарушают светораспределение в воде и подавляют фотосинтез водных растений, а также представляют риск для здоровья человека из-за токсичности и низкой биоразлагаемости [5, 9]. Среди методов очистки адсорбция признана высокоэффективным, экологически приемлемым и экономичным способом удаления красителей [3].

Перевод активированного угля в магнитную форму решает ключевую проблему порошковых сорбентов-сложность отделения от очищенной воды, которое обычно требует фильтрации или центрифугирования [13, 14, 16]. Внесение наночастиц Fe_3O_4 в углеродную матрицу позволяет извлекать отработанный материал внешним магнитным полем без дополнительных энергозатратных стадий [2, 8]. Сельскохозяйственные отходы служат дешёвым и возобновляемым углеродным прекурсором для таких композитов: магнитный активированный уголь получали из багассы [6], рисовой шелухи [14], скорлупы кокоса [17], скорлупы жёлудя [1], шелухи каштана [15], пальмовых ядер [16], кукурузных стеблей [11], эвкалиптовых опилок [3], яблочной кожуры[8] и тростника [9]. Достигаемые ёмкости по МГ в таких системах варьируют в широких пределах-от 12–36 мг/г в ранних работах до 150–1020 мг/г при высокоразвитой пористости.

Одностадийная совместная активация хлоридами цинка и железа одновременно создаёт пористую структуру и придаёт материалу магнитные свойства, упрощая традиционный многостадийный синтез [7, 12]. Такой подход обеспечивает высокие удельные поверхности (до 1775 м²/г) и мезопористость, благоприятную для сорбции красителей. Кислотно-

основные свойства поверхности описываются точкой нулевого заряда: при pH выше pH_pzc поверхность несёт отрицательный заряд и электростатически притягивает катионные молекулы МГ [10]. Значения pH_pzc для углеродных сорбентов из биомассы лежат в диапазоне примерно 4,1–8,3[5, 6, 8, 17].

Эффективность удаления МГ зависит от дозировки сорбента, времени контакта и начальной концентрации красителя. Рост начальной концентрации, как правило, снижает долю удаления из-за насыщения активных центров и затруднения массопереноса, тогда как увеличение дозировки выше некоторого порога уже не даёт заметного прироста очистки.

Таблица 1. Сравнение условий адсорбции МГ в литературе

Параметр	Типичный диапазон в литературе	Примеры
Дозировка сорбента	0,1–2,0 г/л	0,3 г/л [4]; 0,9 г/л [8]; 1,0 г/л [9]
Время контакта до равновесия	30–120 мин	30 мин [9]; 60 мин [14]; 90 мин [10]
Начальная концентрация МГ	10–250 мг/л	10–100 мг/л [8]; 50–250 мг/л [1]
pH_pzc сорбента	4,1–8,3	4,1 [6]; 6,2 [9]; 8,3 [8]

Лузга подсолнечника-массовый отход маслоэкстракционного производства-до сих пор не описана как прекурсор магнитного углеродного сорбента. Настоящая работа восполняет этот пробел: сорбент получают совместной пропиткой лузги растворами $ZnCl_2$ и $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ с последующей термической обработкой в аргоне, а затем оценивают влияние дозировки, продолжительности контакта и начальной концентрации МГ на степень очистки модельных растворов. Результаты определяют границы применимости полученных зависимостей и обосновывают выбор условий удаления красителя в исследованном диапазоне.

Цель работы-получение магнитного углеродного сорбента из лузги подсолнечника посредством совместной пропитки $ZnCl_2$ и $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ с последующей термообработкой и определение влияния массы материала, времени контакта и начальной концентрации метиленового голубого на показатели его удаления. Дополнительной задачей являлась оценка точки нулевого заряда методом дрейфа pH.

Материалы и методы

Использовали высушенную измельчённую лузгу подсолнечника с размером частиц менее 2 мм, $ZnCl_2$ и $FeCl_3 \cdot 6H_2O$. Навеску лузги 60 г помещали в 500 мл воды при 60 °C. Отдельно в 500 мл воды при той же температуре совместно растворяли по 60 г $ZnCl_2$ и $FeCl_3 \cdot 6H_2O$. Раствор солей соединяли с суспензией лузги. Общий объём воды составлял 1000 мл; массовое соотношение загруженных компонентов лузга: $ZnCl_2$: $FeCl_3 \cdot 6H_2O$-1: 1: 1.

Смесь перемешивали при 300 об/мин и 60–70 °C в течение 3–4 ч, затем выдерживали в закрытой ёмкости при комнатной температуре 24 ч. Пропитанную лузгу отделяли фильтрованием без промывки и высушивали при 90–100 °C до постоянной массы.

Термообработку проводили в атмосфере аргона. Температуру повышали со скоростью 5 °C/мин до 250 °C и выдерживали 2 ч, затем при той же скорости нагрева достигали 580 °C и выдерживали ещё 2 ч. После выдержки подачу аргона прекращали и охлаждали образец внутри печи до комнатной температуры. Продукт промывали водой при 60 °C до pH промывных вод 7,3 и высушивали при 80 °C до постоянной массы.

Метиленовый голубой использовали в качестве модельного адсорбата. Опыты проводили в периодическом режиме при объёме раствора 50 мл и температуре 25 °C. Перемешивание выполняли на шейкере при 280 об/мин. Условия серий приведены в таблице 2.

Таблица 2. Условия адсорбционных испытаний

Фактор	Изменяемые значения	Постоянные условия
Масса сорбента	0,02; 0,05; 0,10; 0,15; 0,20 г	C_0 = 25 мг/л; t = 90 мин
Время контакта	30; 60; 90; 120 мин	C_0 = 25 мг/л; m = 0,10 г
Начальная концентрация	10; 15; 20; 25; 30; 35 мг/л	m = 0,10 г; t = 90 мин

После контакта сорбент отделяли внешним магнитом. Остаточную концентрацию красителя определяли на спектрофотометре EMC-30PC-UV при 664 нм.

Удельную адсорбцию и степень удаления рассчитывали по материальному балансу:

$$q_t = (C_0 - C_t)V/m;$$

$$R_t = (C_0 - C_t)/C_0 \times 100\ \%,$$

где C_0 и C_t-начальная и остаточная концентрации красителя, мг/л; V-объём раствора, л; m-масса сухого сорбента, г; q_t-удельная адсорбция, мг/г; R_t-степень удаления, %.

Точку нулевого заряда оценивали методом дрейфа pH. Фоновый электролит $NaNO_3$ концентрацией 0,1 моль/л готовили растворением 8,50 г соли с доведением объёма дистиллированной водой до 1 л. В каждую ёмкость вносили 50 мл электролита. Начальный pH корректировали растворами HNO_3 и NaOH по 0,1 моль/л. Использовали фактические начальные значения pH от 2,28 до 11,28. После измерения pH добавляли 0,10 г сорбента и перемешивали 24 ч при комнатной температуре и 280 об/мин. После отделения сорбента измеряли конечный pH.

Рассчитывали $\Delta pH = pH_f - pH_i$. Пересечение зависимости средних ΔpH от pH_i с нулевой линией определяли локальной линейной интерполяцией.

Результаты и обсуждение

Влияние массы сорбента

Удельная адсорбция уменьшалась с 55,23 до 6,16 мг/г при увеличении навески от 0,02 до 0,20 г. Исходное количество красителя составляло 25 × 0,050 = 1,25 мг. При навесках 0,02 и 0,10 г из раствора удалялось соответственно около 1,105 и 1,238 мг. Следовательно, пятикратное увеличение расхода сорбента повышало количество удалённого вещества

приблизительно на 0,133 мг. Навеска 0,10 г на 50 мл, соответствующая дозировке 2,0 г/л, выбрана для последующих серий как условие почти полного удаления красителя при C_0 = 25 мг/л.

Таблица 3. Влияние массы сорбента на удаление метиленового голубого

m, г	C_t, мг/л	q_t, мг/г	R_t, %
0,02	2,907 ± 0,131	55,23 ± 0,33	88,37 ± 0,52
0,05	1,787 ± 0,304	23,21 ± 0,30	92,85 ± 1,22
0,10	0,240 ± 0,165	12,38 ± 0,08	99,04 ± 0,66
0,15	0,273 ± 0,207	8,24 ± 0,07	98,91 ± 0,83
0,20	0,360 ± 0,346	6,16 ± 0,09	98,56 ± 1,39

Влияние продолжительности контакта

Разница средних удалений для 90 и 120 мин составляла около 0,07 процентного пункта и была существенно меньше наблюдаемого межповторного разброса.

Таблица 4. Изменение показателей адсорбции во времени

t, мин	C_t, мг/л	q_t, мг/г	R_t, %
30	13,567 ± 1,177	5,72 ± 0,59	45,73 ± 4,71
60	6,513 ± 0,750	9,24 ± 0,38	73,95 ± 3,00
90	0,234 ± 0,241	12,38 ± 0,12	99,06 ± 0,96
120	0,251 ± 0,261	12,37 ± 0,13	98,99 ± 1,04

Влияние начальной концентрации

Таблица 5. Концентрационная зависимость адсорбции при времени контакта 90 мин

C_0, мг/л	C_t, мг/л	q_t, мг/г	R_t, %
10	0,149 ± 0,063	4,93 ± 0,03	98,51 ± 0,63
15	0,196 ± 0,112	7,40 ± 0,06	98,69 ± 0,75
20	0,274 ± 0,134	9,86 ± 0,07	98,63 ± 0,67
25	0,307 ± 0,218	12,35 ± 0,11	98,77 ± 0,87
30	1,587 ± 1,041	14,21 ± 0,52	94,71 ± 3,47
35	2,250 ± 1,190	16,38 ± 0,60	93,57 ± 3,40

При увеличении начальной концентрации метиленового голубого с 10 до 35 мг/л адсорбционная ёмкость при времени контакта 90 мин возрастала с 4,93 до 16,38 мг/г. В диапазоне 10–25 мг/л степень удаления составляла 98,51–98,77 %, а при концентрациях 30 и 35 мг/л снижалась до 94,71 и 93,57 % соответственно. Таким образом, увеличение начальной концентрации сопровождалось ростом количества поглощённого красителя на единицу массы сорбента при снижении доли его удаления в верхней части исследованного диапазона.

Точка нулевого заряда

При начальном pH 5,91 среднее ΔpH составляло +0,307, а при pH 6,75-−0,423. Смена знака между соседними точками позволяет локализовать пересечение с нулевой линией внутри экспериментального интервала.

Рисунок 1. Определение точки нулевого заряда

Оценка $pH_pzc \approx 6{,}26$ характеризует материал в условиях применённой процедуры. Полученная оценка pH_pzc согласуется с литературными данными для близких по природе материалов [9,10] и позволяет интерпретировать механизм электростатического взаимодействия катионного красителя с поверхностью.

Обозначение материала как магнитного сорбента опирается на применённое отделение внешним магнитом.

Рисунок 2. а- взаимодействие сорбента с внешним магнитом, б- раствор до и после адсорбции

Заключение

Совместной пропиткой лузги подсолнечника растворами хлоридов цинка и железа с последующим пиролизом получен магнитный углеродный сорбент с точкой нулевого заряда $pH_pzc \approx 6{,}26$. При дозировке сорбента 2,0 г/л (0,10 г на 50 мл раствора), времени контакта 90 мин и начальной концентрации метиленового голубого 25 мг/л степень удаления красителя составляла 98,77–99,06 %, а остаточная концентрация — 0,23–0,31 мг/л в различных экспериментальных сериях. При увеличении начальной концентрации красителя с 10 до 35 мг/л адсорбционная ёмкость при времени контакта 90 мин возрастала с 4,93 до 16,38 мг/г, при этом степень удаления составляла 93,57–98,77 % Магнитные свойства материала позволяли отделять его от водной фазы внешним магнитом.

Список литературы

1. Altıntıg E. [и др.]. Effective removal of methylene blue from aqueous solutions using magnetic loaded activated carbon as novel adsorbent // Chemical Engineering Research and Design. – 2017. – P. 151–163.
2. Asrani A. [и др.]. Magnetic modification of pine needle-derived activated carbon for dye removal with facilitated recovery from wastewater // Applied Water Science. – 2026. – № 9 (16).
3. Chen C. [и др.]. Single-step synthesis of eucalyptus sawdust magnetic activated carbon and its adsorption behavior for methylene blue // RSC Advances. – 2019. – № 39 (9). – P. 22248–22262.
4. Chistie S.M. [и др.]. Production and characterization of magnetic Biochar derived from pyrolysis of waste areca nut husk for removal of methylene blue dye from wastewater // Scientific Reports. – 2025. – № 1 (15).
5. Fito J. [и др.]. Adsorption of methylene blue from textile industrial wastewater using activated carbon developed from Rumex abyssinicus plant // Scientific Reports. – 2023. – № 1 (13).
6. Jiang W. [и др.]. Adsorption of cationic dye from water using an iron oxide/activated carbon magnetic composites prepared from sugarcane bagasse by microwave method // Environmental Technology. – 2021. – № 3 (42). – P. 337–350.
7. Lee L.Z., Ahmad Zaini M.A. One-step ZnCl2/FeCl3 composites preparation of magnetic activated carbon for effective adsorption of rhodamine B dye // Toxin Reviews. – 2022. – № 1 (41). – P. 64–81.
8. Mohammadi P., Khajenoori M., Ghandali M. Synthesis of magnetite nanocomposite supported on apple peel-derived activated carbon for removal of methylene blue from aqueous solutions // Scientific Reports. – 2026. – № 1 (16).
9. Mortada W.I. [и др.]. Mesoporous magnetic biochar derived from common reed (Phragmites australis) for rapid and efficient removal of methylene blue from aqueous media // Environmental Science and Pollution Research. – 2024. – № 29 (31). – P. 42330–42341.

10. Muteeb G. [и др.]. Removal of methylene blue (MB) dye from water and wastewater using acid-activated chicken bone in a batch adsorption process // Scientific Reports. – 2025. – № 1 (15).
11. Nille O.S. [и др.]. One-step in-situ sustainable synthesis of magnetic carbon nanocomposite from corn comb (MCCC): agricultural biomass valorisation for pollutant abatement in wastewater // Environmental Science and Pollution Research International. – 2023. – № 13 (30). – P. 38425–38442.
12. Omar N.A., Al-Shaker Y.M. S., Fadhil A.B. Development of mesoporous activated carbon from waste tires rubber via one-step activation using a blend of ZnCl2/FeCl3 and its application in Eriochrome Black T and Cr(VI) removal from aqueous phase // International Journal of Environmental Analytical Chemistry. – 2024. – № 19 (104). – P. 7632–7656.
13. Qin N. [и др.]. Economical magnetic activated carbon for methylene blue removal from water // Next Sustainability. – 2024.
14. Rao Vaddi D., Malla R., Geddapu S. Magnetic activated carbon: A promising approach for the removal of methylene blue from wastewater // Desalination and Water Treatment. – 2024.
15. Toprak A. Çokal M.H. Hydrothermal synthesis of high surface area magnetically activated carbon nanocomposites from spinal chestnut shells for effective methylene blue removal // Fuel Processing Technology. – 2026.
16. Waluyo J. [и др.]. The Synthesis of Magnetic Activated Carbon from Palm Kernel Shells and Effectiveness Test on the Methylene Blue // Nusantara Science and Technology Proceedings. – 2025. – P. 147–154.
17. Yağmur H.K. Kaya İ. Synthesis and characterization of magnetic ZnCl2-activated carbon produced from coconut shell for the adsorption of methylene blue // Journal of Molecular Structure. – 2021.

Статья поступила в редакцию: 04.11.2026
Статья принята к публикации: 12.11.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 622.277: 622.79

DOI: 10.32743/UniTech.2026.152.11.23711

Оценка влияния гранулометрического состава и пористости на кучное выщелачивание бедных урановых руд

Нурбоев Кувондик Мирзанович
ст. науч. сотр., Навоийское отделение Академии наук
Республика Узбекистан, г. Навои
ORCID:https://orcid.org/0009-0003-3558-0324
E-mail: kuvondik@g.mail.com
Мустафоев Муталжон Амруллоевич
самостоятельный соискатель
Навоийский государственный горно-технологический университет
Республика Узбекистан, г. Навои
ORCID: https://orcid.org/0009-0007-9296-1878
E-mail: amrullomuzafarov65@gmail.com
Аллаберганова Гульчехра Машариповна
д-р филос. (PhD) по хим. наукам, доц.
Навоийский государственный горно-технологический университет
Республика Узбекистан, г. Навои
ORCID:https://orcid.org/0009-0000-3591-1910
E-mail: gallaberganova56@gmail.com
Музафаров Амрулло Мустафоевич
д-р хим. наук, проф.
Навоийский государственный горно-технологический университет
Республика Узбекистан, г. Навои
https://orcid.org/0000-0003-3856-9342
E-mail: a.muzafarov@gmail.uz

Assessment of the effects of particle size distribution and porosity on heap leaching of low-grade uranium ores

Nurboyev Quvondik Mirzanovich
Senior research fellow, Navoi Branch of the Academy of Sciences
Uzbekistan, Navoi
Mustafoyev Mutaljon Amrulloyevich
Independent researcher
Navoi State University of Mining and Technology
Uzbekistan, Navoi

Библиографическое описание: Оценка влияния гранулометрического состава и пористости на кучное выщелачивание бедных урановых руд // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Нурбоев К.М. [и др.]. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23711

Allaberganova Gulchehra Masharipovna
Associate Professor, PhD
in Chemical Sciences, Navoi State University of Mining and Technology
Uzbekistan, Navoi
Muzafarov Amrullo Mustafoyevich
professor, Doctor of Chemical Sciences
Navoi State University of Mining and Technology
Uzbekistan, Navoi

Аннотация

Цель работы - оценить возможность преимущественной переработки мелкой фракции бедной урановой руды на основе распределения урана между размерными группами и расчётного анализа влияния кремневой добавки на пористость и проницаемость загрузки для кучного выщелачивания. Исследованы девять фракционных проб общей массой 1200 кг, объединённых в крупную и мелкую группы. Методология включает материально-балансовый анализ, расчёт средневзвешенного содержания урана и сценарное моделирование свойств слоя при добавлении 10-30 % кремневых зёрен размером 2-8 мм. Собственная проницаемость оценена по соотношению Козени-Кармана. Установлено, что мелкая фракция составляет около 38 % массы руды и содержит около 73 % учтённого урана. При принятом содержании урана в исходной руде 350 г/т его содержание в мелком продукте составляет около 672 г/т. В модели с неизменным исходным объёмом пустот добавление кремня снижает пористость мелкой загрузки с 7,41 до 5,75 %, а собственную проницаемость - с $2{,}63 \times 10^{-14}$ до $(1{,}98\text{-}2{,}03) \times 10^{-14}$ м². Полученные результаты обосновывают целесообразность испытания предварительной классификации для концентрирования урана в меньшей массе материала. При этом выбранная модель не подтверждает улучшения фильтрации при введении кремня. Технологическую эффективность разделения и оптимальную величину добавки необходимо устанавливать колонными испытаниями с учётом извлечения урана, устойчивости орошения и удельного расхода кислоты.

Abstract

This study aims to assess the feasibility of preferentially processing the fine fraction of low-grade uranium ore by examining uranium distribution between size groups and modelling the effects of flint addition on bed porosity and permeability during heap leaching. Nine fraction samples with a total mass of 1,200 kg were classified into coarse and fine groups. The methodology combines material balance analysis, calculation of weighted mean uranium grades, and scenario modelling of bed properties with additions of 10-30 % flint grains measuring 2-8 mm. Intrinsic permeability was estimated using the Kozeny-Carman relationship. The fine fraction accounts for approximately 38 % of the ore mass and 73 % of the uranium inventory. For an assumed feed grade of 350 g/t, the fine-product grade is approximately 672 g/t. Under the assumption of a constant initial void volume, flint addition decreases fine-bed porosity from 7.41 % to 5.75 % and intrinsic permeability from 2.63×10^{-14} to $(1.98\text{-}2.03) \times 10^{-14}$ m². These findings support testing preliminary classification to concentrate uranium in a smaller material mass. However, the adopted model does

not demonstrate improved filtration following flint addition. The effectiveness of classification and the optimal flint dosage require column testing that accounts for uranium recovery, irrigation stability, and specific acid consumption.

Ключевые слова: бедная урановая руда, гранулометрический состав, кучное выщелачивание, пористость, проницаемость.

Keywords: low-grade uranium ore, particle size distribution, heap leaching, porosity, permeability.

Введение

Кучное выщелачивание рассматривается как вариант переработки урановых руд, для которого состав питания, скорость орошения, проницаемость и расход реагентов определяют технологические показатели [5]. Руководства МАГАТЭ рекомендуют начинать выбор схемы с лабораторных испытаний и учитывать минералогию, кислотопоглощение и извлечение урана [6, 7]. Физическое разделение руды до выщелачивания может уменьшать массу материала, поступающего на химическую обработку, однако степень сохранения урана в концентрируемой фракции должна учитываться вместе с потерями ценного компонента [8, 9]. Работы по низкосортному сырью и техногенным материалам также показывают, что перенос технологических показателей между различными типами руд без испытаний некорректен [10, 11].

На примере Стрельцовской группы месторождений описана схема разделения низкосортной руды по крупности с различными маршрутами последующей переработки [12]. При этом выбор направления для мелкой части нельзя предрешать: высокое содержание урана может сопровождаться закупоркой пор и неравномерным орошением. Колонные исследования агломератов урановых руд выявили изменение пористости и проницаемости в ходе орошения и зависимость результата от механической устойчивости слоя [3, 4]. Добавление крупного материала в одном из опубликованных опытов повысило извлечение, но его численный оптимум относится к конкретной руде и условиям опыта [13].

Минеральный состав пустой породы влияет на кислотопоглощение, поэтому снижение массы питания нельзя автоматически приравнивать к пропорциональному снижению расхода кислоты [15]. Соотношения типа Козени-Кармана полезны для ориентировочных оценок, но не описывают полностью структуру пор, каналообразование и реакционные изменения [2]. Для бинарных смесей крупных и мелких зёрен наблюдаются переходные режимы: до критического соотношения добавление крупных частиц может даже снижать гидравлическую проводимость [1]. В имеющихся девяти пробах распределение урана по двум условно заданным классам определено; параметры грохочения, кислотопоглощение и фильтрация не измерены.

Цель работы - оценить возможность преимущественной переработки мелкой фракции бедной урановой руды на основе распределения урана между размерными группами и расчётного анализа влияния кремневой добавки на пористость и проницаемость загрузки для кучного выщелачивания. Для достижения поставленной цели выполнены материально-

балансовый анализ девяти фракционных проб, определение групповых содержаний и распределения урана, а также сценарный расчёт пористости и собственной проницаемости смесей при различной массовой доле и крупности кремневых зёрен.

Материалы и методы

Исходный массив включает девять фракционных проб общей массой 1200 кг. Пробы № 1-4 отнесены к крупной, № 5 – 9 - к мелкой группе согласно исходной классификации. Размер ячейки вибрационного грохота и фактические гранулометрические интервалы проб не представлены. Для рассмотрения сценария переработки бедной урановой руды содержания урана во всех пробах пропорционально нормированы до средневзвешенного содержания 350 г/т в исходном материале. Коэффициент нормирования составляет 0,299369; соотношения содержаний между пробами и распределение урана между группами сохранены. Приведённые нормированные содержания являются расчётными величинами. Масса урана в каждой пробе рассчитана как произведение массы пробы в килограммах на нормированное содержание урана в граммах на тонну, делённое на 1000. Средневзвешенное содержание урана в каждой группе определено по отношению суммарной массы урана к массе группы. Расчёты выполнены до округления итоговых значений.

В предлагаемой технологической схеме предварительное дробление и вибрационное грохочение создают две размерные ветви. Крупный продукт анализируют на содержание урана и кислотопоглощение до решения о его отдельной переработке либо исключении из питания. Мелкий продукт подают на колонные испытания в исходном виде и с 10, 15, 20, 25 и 30 % кремневых зёрен по отношению к массе мелкой руды. Грохот разделяет материал по размеру, а не распознаёт кремень или урановые минералы по составу. Возможность образования и поддержания фильтрационных каналов проверяют прямым измерением, а не выводят из факта добавления крупных зёрен.

Для демонстрационного расчёта приняты сухая объёмная плотность исходной смеси 2200 кг/м³ и мелкой фракции 2500 кг/м³, плотность зёрен руды 2700 кг/м³ и плотность отдельных зёрен кремня 2600 кг/м³. Последнее значение соответствует паспортному удельному весу кремневой гальки производителя; его насыпная плотность является иной величиной [14]. Первые три плотности здесь заданы сценарно, а не определены для исследуемой руды. Условный характер имеют также характерный размер мелкой руды 0,1 мм и допущение об отсутствии изменения первоначального объёма пустот при введении кремня.

Объём пор оценён как разность начального объёма слоя и объёма зёрен руды; объём кремня - по его массе и плотности 2600 кг/м³. Общий объём слоя в сценарии равен сумме начального объёма слоя и объёма введённых зёрен. Сухая плотность - отношение общей массы к этому объёму, пористость - отношение сохранённого объёма пор к общему объёму. Эквивалентный размер d_{32} получен из суммарного объёма твёрдых частиц и объёмно-взвешенной обратной крупности двух компонентов. Собственная проницаемость оценена выражением $k = d_{32}^2\,\varphi^3 / [180(1-\varphi)^2]$, где φ - доля пор и d_{32} выражен в метрах. Это сценарная оценка при предпосылках геометрической модели, не результат фильтрационного опыта.

Для последующего определения технологической эффективности нужны параллельные колонны равной высоты, сухая масса и состав каждой загрузки, измерения сухой и насыщенной пористости, расхода при заданном напоре или гидравлического градиента при заданном расходе, кривые концентрации U в фильтрате, суммарное извлечение, кислотопоглощение породы и удельный расход кислоты на 1 кг извлечённого U. Эффект классификации рассчитывают на исходную тонну всей руды с учётом урана в отвергнутой крупной фракции. Без этих данных проценты экономии и оптимальная добавка не назначаются.

Результаты

Исходные значения девяти проб и восстановленная масса урана приведены в таб. 1.

Таблица 1. Масса, доля и содержание урана в отдельных пробах

Проба	Масса, кг	Доля, %	U, г/т	U, г
1 (крупная)	164,4	13,700	167,65	27,5611
2 (крупная)	131,28	10,940	32,93	4,3231
3 (крупная)	175,8	14,650	188,60	33,1563
4 (крупная)	272,64	22,720	176,63	48,1557
5 (мелкая)	117	9,750	356,25	41,6811
6 (мелкая)	53,712	4,476	478,99	25,7275
7 (мелкая)	44,7	3,725	706,51	31,5810
8 (мелкая)	156,24	13,020	760,40	118,8044
9 (мелкая)	84,228	7,019	1056,77	89,0098
Итого / средневзвешенное	**1200**	**100,000**	**350,00**	**420,0000**

Небольшие различия между пересчитанными долями и исходными округлёнными процентами обусловлены округлением: групповые суммы и масса урана вычислены по массам, а не по округлённым процентным долям. В исходных данных нет ситовых размеров и неопределённостей измерения содержания U.

Баланс после условного разделения на две фракции сводится в таб.2.

Таблица 2. Материальный баланс урана при фракционировании

Показатель	Крупная	Мелкая	Вся руда
Масса, кг	744,12	455,88	1200,00
Доля массы, %	62,01	37,99	100,00
Масса U, г	113,196	306,804	420,000
Доля U, %	26,95	73,05	100,00
Среднее U, г/т	152,12	672,99	350,00

При направлении на переработку только мелкой части масса питания уменьшается на 62,01 %, но в исключаемой крупной части остаётся 26,95 % урана. Это расчётный баланс разделения, а не извлечение металла: фактический выход U после выщелачивания будет ниже доли U в питании и зависит от кинетики растворения.

Доли массы по отдельным пробам представлены на рис. 1.

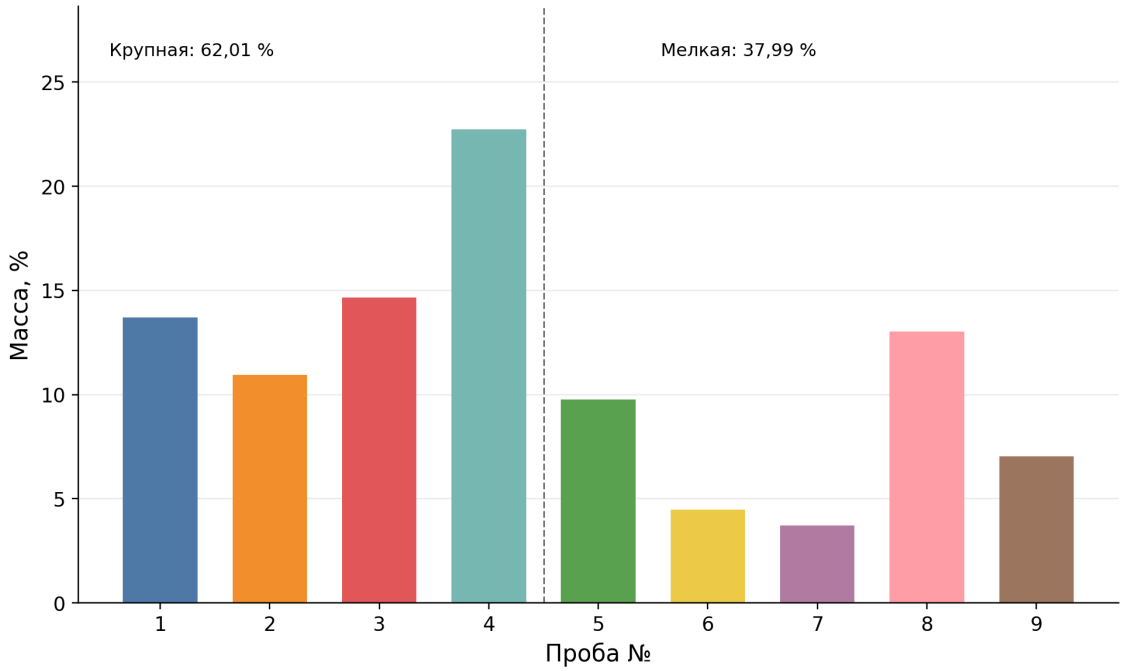


Рисунок 1. Распределение массы между девятью пробами

Пробы 1-4 составляют крупную ветвь (62,01 % массы), пробы 5-9 - мелкую (37,99 %). Цвета различают отдельные пробы; пунктирная граница показывает условное разделение после грохочения.

Для сопоставления с массовым балансом доли учтённого урана показаны на рис. 2.

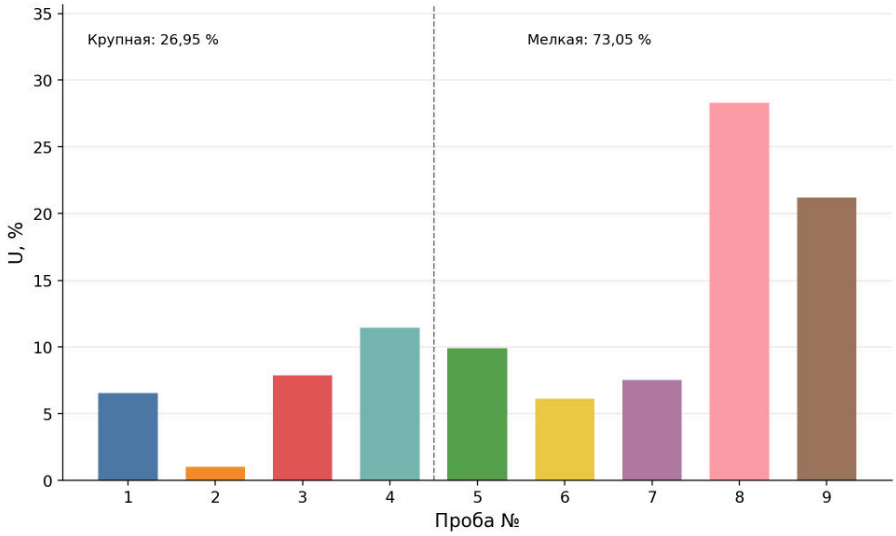


Рисунок 2. Распределение учтённой массы урана между пробами

В пяти мелких пробах сосредоточено 73,05 % урана, хотя их суммарная масса составляет 37,99 % питания. Рисунок отражает лишь распределение U в твёрдом материале; скорость и полноту перехода U в раствор он не характеризует.

Показатели рассчитанной сухой плотности и пористости в двух вариантах питания приведены в таб. 3.

Таблица 3. Сценарные плотность и пористость при добавлении кремня

Кремень, % к массе руды	ρd руда, кг/м³	φ руда, %	ρd мелкая, кг/м³	φ мелкая, %
0	2200,0	18,52	2500,0	7,41
10	2231,2	17,07	2508,8	6,76
15	2245,1	16,43	2512,6	6,47
20	2257,9	15,84	2516,1	6,21
25	2269,8	15,29	2519,4	5,97
30	2281,0	14,77	2522,4	5,75

Плотности 2200 и 2500 кг/м³ - заданные исходные условия двух расчётных вариантов. Значения таблицы не являются результатом измерения уплотнения после грохочения. Повышение плотности при добавлении кремня здесь следует непосредственно из принятого постоянного объёма исходных пустот.

Наглядное сопоставление двух вариантов по плотности приведено на рисунке 3.

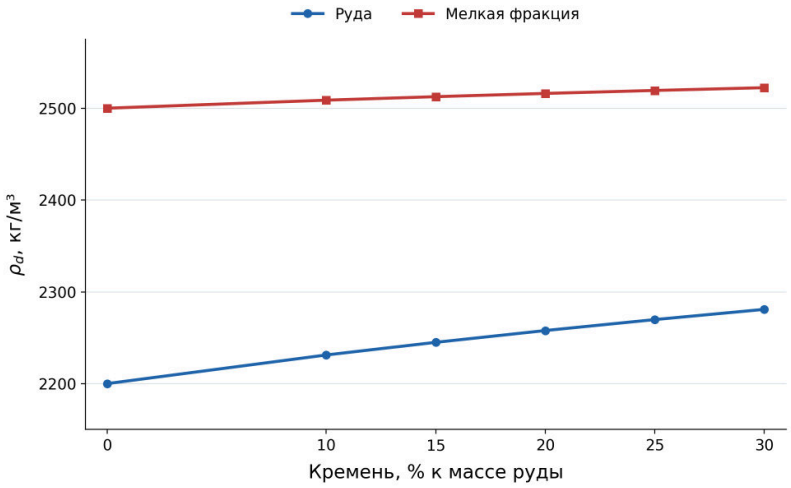


Рисунок 3. Сухая плотность в зависимости от массовой добавки кремня

Для мелкой ветви ρ_d возрастает с 2500 до 2522,4 кг/м³, для всей руды - с 2200 до 2281,0 кг/м³. Различие задано исходными сценарными плотностями и не свидетельствует само по себе о лучшем протекании раствора.

Изменение геометрической доли пор при тех же условиях показано на рис. 4.

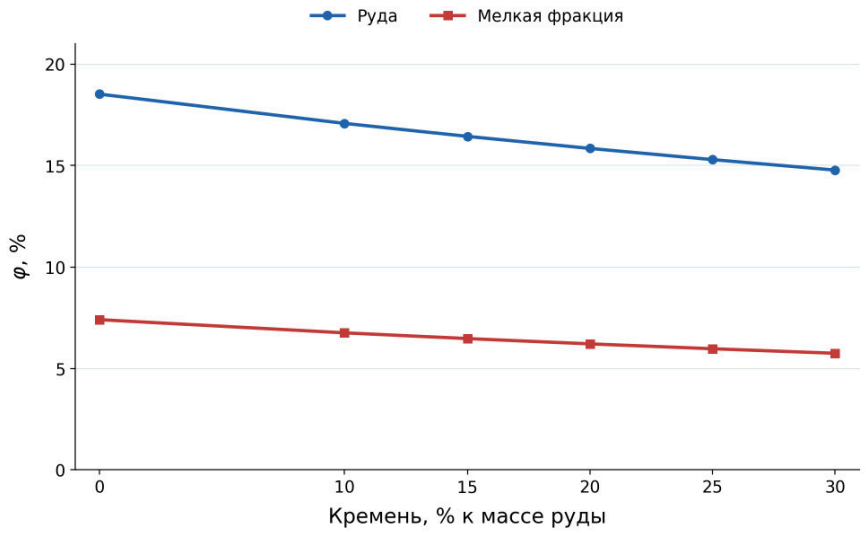


Рисунок 4. Пористость в зависимости от массовой добавки кремня

Расчётная пористость мелкой фракции уменьшается с 7,41 до 5,75 %, всей руды - с 18,52 до 14,77 %. Эти значения относятся к явному допущению о неизменном исходном объёме пор. Реальная укладка зёрен 2-8 мм может дать иную зависимость, которую следует определить экспериментально.

Чувствительность расчётной собственной проницаемости мелкой фракции к размеру кремня приведена в таб. 4.

Таблица 4. Сценарная проницаемость мелкой фракции (k, 10^{-14} м²)

Кремень, %	U в смеси, г/т	k 2 мм	k 4 мм	k 6 мм	k 8 мм
0	672,0	2,634	2,634	2,634	2,634
10	612,0	2,378	2,390	2,394	2,396
15	585,2	2,266	2,284	2,290	2,293
20	560,8	2,164	2,186	2,194	2,198
25	538,4	2,069	2,096	2,105	2,110
30	517,7	1,982	2,013	2,023	2,028

Все значения k в четырёх правых столбцах выражены в единицах 10^{-14} м². Содержание U в смеси рассчитано при условии отсутствия урана в добавленном кремне и отражает разбавление мелкого продукта. При увеличении добавки от 0 до 30 % к массе мелкой руды содержание U уменьшается с 672,99 до 517,69 г/т. Добавление кремня увеличивает массу загрузки при сохранении массы содержащегося в ней урана. Крайние исследованные размеры кремня и их влияние на расчёт k сопоставлены на рис. 5.

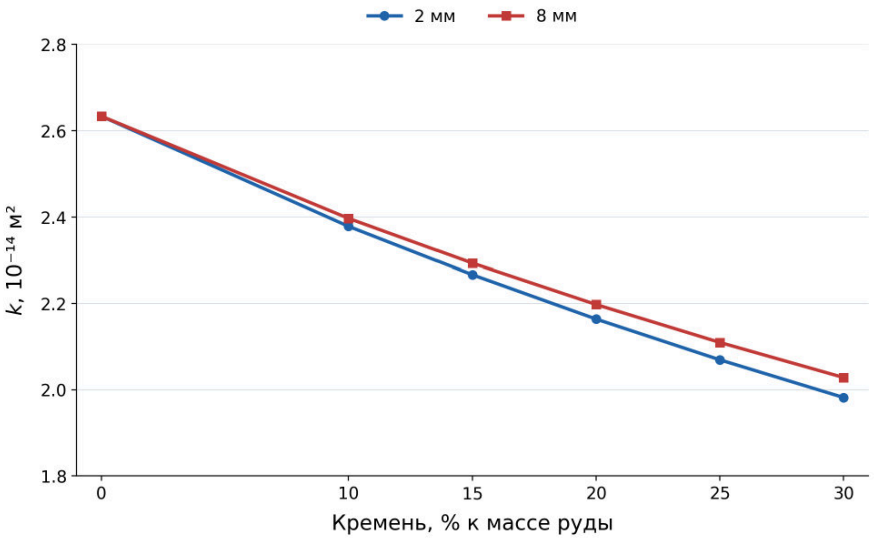


Рисунок 5. Собственная проницаемость мелкой фракции при размере кремня 2 и 8 мм

В принятой модели k снижается с 2,63 до 1,98-2,03·10^{-14} м² к 30 % добавки; разница между диаметрами 2 и 8 мм невелика. Линии относятся только к мелкой фракции: для исходной руды характерный размер зёрен и измеренная проницаемость не заданы. Экспериментально наблюдаемое повышение фильтрации может возникать при изменении объёма связных пор или путей течения и этой упрощённой моделью не предсказывается.

Обсуждение

При нормировании исходной руды до среднего содержания U 350 г/т расчётное содержание урана в мелком продукте составляет 672,99 г/т, то есть возрастает в 1,92 раза. В мелкую группу переходит 73,05 % учтённого урана при выходе 37,99 % массы руды. Вместе с тем крупная группа содержит 113,20 г U при среднем содержании 152,12 г/т, поэтому её исключение из переработки означает исключение 26,95 % исходного количества урана. Такой материал нельзя считать пустой породой без установленного порога отсечения и технико-экономического обоснования. Возможные направления его использования включают отдельное выщелачивание, повторное сортирование либо контролируемое складирование с учётом радиационных характеристик. Полученное распределение характеризует рассматриваемую партию и требует проверки на независимых партиях с установленными ситовыми классами.

Сокращение перерабатываемой массы создаёт возможность снизить общий расход раствора, объём площадки и обработку кислотопоглощающей пустой породы. Однако известная доля массы 62,01 % не является оценкой экономии кислоты: кислотопоглощение крупной и мелкой ветвей, эффективность растворения и возврат раствора не измерены. Сравнивать следует массу H_2SO_4 на исходную тонну питания и на килограмм извлечённого U при одинаковом целевом извлечении, времени цикла и режиме орошения.

Введение кремня размером 2-8 мм рассматривается как способ изменить структуру слоя, но эффект не следует из одного лишь размера камешков. Мелкие частицы могут заполнить промежутки между крупными; после достижения переходного состава возможно образование более проводящих каналов [1]. Упрощённая модель с неизменным объёмом пор предсказывает противоположное - монотонное уменьшение φ и k. Это не опровержение

наблюдений автора, а указание на отсутствующий в модели механизм перестройки упаковки. Кроме того, при орошении кислота может изменять минеральный состав и устойчивость слоя [3, 4].

Проверяемая технологическая гипотеза состоит в том, что предварительное отделение малоперспективной крупной ветви вместе с подобранной укладкой мелкого материала позволяет удержать приемлемые извлечение и фильтрацию при меньшем удельном расходе реагента на исходную тонну. Для её проверки необходимо подобрать размер грохота, измерить гранулометрические кривые, содержание и форму нахождения U, карбонатность, кислотопоглощение и сухую плотность обеих ветвей. Колонны с 0, 10, 15, 20, 25 и 30 % кремня следует испытывать минимум в повторностях при одинаковой высоте, гидравлической нагрузке и химическом режиме. Оптимум устанавливают по совокупности извлечения, времени и расхода кислоты, а не по единственной максимальной пористости.

Заключение

По результатам материально-балансового расчёта мелкая фракция объединяет 73,05 % учтённого урана при 37,99 % массы руды. При нормировании среднего содержания U в исходном материале до 350 г/т его содержание в мелком продукте составляет 672,99 г/т, а в крупном - 152,12 г/т. Выделение мелкой фракции обеспечивает расчётное повышение содержания урана в 1,92 раза и уменьшение массы питания основного передела на 62,01 %. При этом в крупной фракции остаётся 26,95 % исходного урана. Выбор маршрута её дальнейшей переработки требует оценки извлекаемости урана и технико-экономического обоснования.

При заданных сценарных плотностях и сохранении объёма пор добавление 10-30 % кремня повышает сухую плотность мелкой загрузки, уменьшает её пористость и снижает оценку собственной проницаемости по Козени-Карману. Численные значения не являются измеренными свойствами руды, а выбранная модель не позволяет подтвердить рост проницаемости или определить оптимальную дозу кремня.

Перспектива технологии определяется совместным колонным сравнением всей руды, мелкой фракции и смесей мелкой фракции с кремнем. Критерии - извлечение U из исходной тонны руды, устойчивость орошения, длительность цикла и расход кислоты на килограмм извлечённого U. До получения этих результатов заявлять достигнутую экономию реагента преждевременно.

Список литературы

1. Chung, C.-K. Hydraulic conductivity variation of coarse-fine soil mixture upon mixing ratio / C.-K. Chung, J.-H. Kim, J. Kim, T. Kim // Advances in Civil Engineering. – 2018. – Art. 6846584. – DOI: 10.1155/2018/6846584.
2. Hommel, J. Porosity-permeability relations for evolving pore space: a review with a focus on (bio-)geochemically altered porous media / J. Hommel, E. Coltman, H. Class // Transport in Porous Media. – 2018. – T. 124. – P. 589–629. – DOI: 10.1007/s11242-018-1086-2.

3. E. Hoummady, F. Golfier, M. Cathelineau [et al.]. An integrated multiscale approach to heap leaching of uranium-ore agglomerates // Hydrometallurgy. – 2018. – T. 178. – P. 274–282. – DOI: 10.1016/j.hydromet.2018.05.011.
4. E. Hoummady, F. Golfier, M. Cathelineau [et al.]. A study of uranium-ore agglomeration parameters and their implications during heap leaching // Minerals Engineering. – 2018. – T. 127. – P. 22–31. – DOI: 10.1016/j.mineng.2018.07.012.
5. Uranium extraction technology / International Atomic Energy Agency. – Vienna: IAEA, 1993. (Technical Reports Series;). – № 359. – 358 P. (дата обращения: 04.11.2026).
6. Manual on laboratory testing for uranium ore processing / International Atomic Energy Agency. – Vienna: IAEA, 1990. (Technical Reports Series;). – № 313. (дата обращения: 04.11.2026).
7. Uranium production cycle: selected papers 2012–2015. – Vienna: IAEA, 2019. (IAEA-TECDOC-1873). – 306 P. (дата обращения: 04.11.2026).
8. Surficial uranium deposits. – Vienna: IAEA, 1984. (IAEA-TECDOC-322). – 252 P. (дата обращения: 04.11.2026).
9. Uranium ore processing / International Atomic Energy Agency. – Vienna: IAEA, 1977. (Panel Proceedings Series;). – STI/PUB/453. – № 115. (дата обращения: 04.11.2026).
10. Processing of low grade uranium ores / International Atomic Energy Agency. – Vienna: IAEA, 1967. (Panel Proceedings Series;). – STI/PUB/146. – № 13. (дата обращения: 04.11.2026).
11. A preliminary inventory and assessment of uranium resources in mine wastes / International Atomic Energy Agency. – Vienna: IAEA, 2021. (IAEA-TECDOC-1952). – 118 P. (дата обращения: 04.11.2026).
12. Improvement of the technology of treatment of uranium ores from the Streltsovsky group of deposits. // URAM-2014: [сайт конференции МАГАТЭ]. – 2014. (дата обращения: 04.11.2026).
13. Nagar, M. Acidic heap leaching behavior of uranium from El-Sela area, South Eastern Desert, Egypt / M. Nagar, W. Morsy // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2021. – T. 329. – P. 1073–1082. – DOI: 10.1007/s10967-021-07841-6.
14. Flint pebbles: technical details. // Sibelco Ceramics Tools: [сайт]. (дата обращения: 04.11.2026).
15. Youlton, B.J. Gangue-reagent interactions during acid leaching of uranium / B.J. Youlton, J.A. Kinnaird // Minerals Engineering. – 2013. – T. 52. – P. 62–73. – DOI: 10.1016/j.mineng. 2013.03.030.

Статья поступила в редакцию: 14.11.2026
Статья принята к публикации: 21.11.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 378.147:62

DOI: 10.32743/UniTech.2026.152.11.23784

Применение методики SCAMPER в преподавании технических дисциплин (на примере пластинчатого теплообменника)

Рейпназарова Зинахан Даулетназаровна
канд. техн. наук, доц.
Нукусский государственный технический университет
Республика Каракалпакстан, г. Нукус
E-mail: zinaxanr@gmail.com

Application of the SCAMPER methodology in teaching technical disciplines (the case of a plate heat exchanger)

Reypnazarova Zinakhan
candidate of Technical Sciences
Nukus State Technical University
Republic of Karakalpakstan, Nukus

Аннотация

В статье рассматриваются педагогические возможности применения методики SCAMPER при преподавании технических дисциплин в высших образовательных учреждениях. Особое внимание уделяется развитию познавательной активности студентов, формированию творческого и инженерного мышления, а также совершенствованию навыков поиска альтернативных технических решений. В качестве практического примера рассматривается изучение конструкции, принципа действия и функциональных особенностей пластинчатого теплообменника. Представлены семь направлений методики SCAMPER (замена, комбинирование, адаптация, модификации, применение в других целях, исключение и перестановка), а также разработанные на их основе направляющие вопросы для анализа конструкции и выявления потенциальных возможностей совершенствования промышленного оборудования. В учебном эксперименте приняли участие 16 студентов, которые процесса коллективного обсуждения разработали общую таблицу инженерных предложений по модернизации пластинчатого теплообменника. Проведён качественный анализ полученных предложений, определены особенности их соответствия отдельным направлениям SCAMPER и выявлены возможности использования методики для организации проектной и исследовательской деятельности студентов. Результаты работы свидетельствуют о том, что

Библиографическое описание: Рейпназарова З.Д. Применение методики SCAMPER в преподавании технических дисциплин (на примере пластинчатого теплообменника) // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23784

применение SCAMPER способствует активизации коллективной творческой деятельности, развитию навыков инженерного анализа и интеграции теоретических знаний с решением практико-ориентированных инженерных задач. Предложенный подход может быть использован при разработке интерактивных методов обучения и совершенствовании практической подготовки будущих инженеров.

Abstract

The article examines the pedagogical potential of applying the SCAMPER methodology in teaching technical disciplines in higher education institutions. Particular attention is paid to enhancing students' cognitive engagement developing creative and engineering thinking, and improving their ability to identify alternative technical solutions. As a practical example, the design, operating principles, and functional characteristics of a plate heat exchanger are examined. The seven SCAMPER methodology (Substitute, Combine, Adapt Modify, Put to another use, Eliminate, and Rearrange) are presented, together with guiding questions designed to facilitate the structural analysis and identify potential improvements to industrial equipment. The educational experiment involved 16 students who, through collaborative discussion, developed a consolidated table of engineering proposals for improving the design and performance of a plate heat exchanger. A qualitative analysis of the proposed solutions was conducted to determine their correspondence with the individual SCAMPER components and assess their practical engineering relevance. The study also explores the pedagogical potential of this methodology for organizing collaborative creative activities and developing students’ problem-solving skills. The findings indicate that the application of SCAMPER promotes active student participation, encourages creative collaboration, and facilitates the integration of theoretical knowledge with practical engineering challenges. The proposed approach can be incorporated into technical education to enhance students’ design thinking, analytical abilities, and readiness to address real-world engineering problems.

Ключевые слова: SCAMPER, технические дисциплины, творческое мышление, пластинчатый теплообменник, модернизация оборудования, коллективная работа, инженерные решения.

Keywords: SCAMPER, technical disciplines, creative thinking, plate heat exchanger, equipment modernization, collective work, engineering solutions.

Введение

Современное развитие науки, техники и производства предъявляет новые требования к профессиональной подготовке будущих инженеров. Цифровизация производственных процессов, внедрение автоматизированных систем управления, компьютерного моделирования и инновационных технологий требуют от специалистов не только глубоких теоретических знаний, но и способности самостоятельно анализировать технические проблемы, выдвигать гипотезы и разрабатывать нестандартные инженерные решения.

В системе высшего технического образования особое значение приобретает развитие инженерного и творческого мышления студентов. Данные качества позволяют будущему инженеру сочетать аналитический подход с творческим поиском, находить альтернативные способы решения технических задач и оценивать эффективность предлагаемых конструктивных изменений.

Традиционные методы преподавания технических дисциплин преимущественно ориентированы на усвоение теоретического материала, изучение конструкций аппаратов, расчёт технологических параметров и решение типовых инженерных задач. Вместе с тем современная инженерная практика требует применения таких образовательных подходов, которые стимулируют самостоятельное мышление студентов, их инициативность и способность генерировать новые идеи.

Методика SCAMPER помогает развивать творческое мышление и находить новые идеи. Она включает семь простых приёмов: заменить, объединить, адаптировать, изменить, использовать по-другому, убрать и поменять местами. Основой этой методики стали идеи А. Осборна, а позднее Р. Эберле объединил их в систему SCAMPER. С помощью этой методики обучающиеся учатся по-новому смотреть на привычные вещи, самостоятельно находить решения и проявлять творчество [9,5].

В современных образовательных исследованиях рассматриваются возможности применения SCAMPER для стимулирования творческого мышления и повышения активности обучающихся [4]. Значимость активных методов обучения в подготовке инженерных специалистов также подчёркивается в работах М. Принса, Р. Фелдера и Р. Брента [10, 7].

Eberle в своей книге *SCAMPER: Games for Imagination Development* [6] описывает методику SCAMPER, которая помогает развивать творческое мышление и находить новые идеи. Она включает семь простых способов: заменить, объединить, приспособить, изменить, использовать по-другому, убрать и поменять местами. Эта методика помогает искать новые решения различных задач. Её также можно использовать при разработке новых конструкций теплообменников и улучшении их работы.

Применение данной методики в преподавании технических дисциплин позволяет рассматривать изучаемое оборудование не только как готовый технический объект, но и как систему, конструкцию и функциональные характеристики которой можно анализировать и совершенствовать.

В 2020 году данная методика также изучалась зарубежными учёными. Например, A. Sayed, K. Kotb и G. Shehata исследовали её применение для развития навыков творческого письма у студентов. A. Kamis и другие авторы изучали, как SCAMPER помогает развивать творческое мышление студентов при обучении дизайну одежды. Эти исследования показывают, что методика SCAMPER может быть полезна в обучении и развитии творческих способностей [1,3].

В связи с этим целью настоящего исследования является рассмотрение возможностей применения методики SCAMPER в преподавании технических дисциплин на примере пластинчатого теплообменника, а также организация коллективной работы студентов по поиску возможных вариантов совершенствования промышленного оборудования.

Материалы и методы

Методика SCAMPER представляет собой инструмент творческого мышления, основанный на использовании направляющих вопросов для поиска новых идей и возможных способов преобразования существующих объектов.

Название методики образовано начальными буквами семи английских слов:

- S -Substitute (Замена): замена отдельных элементов, материалов или компонентов.

- C - Combine (Комбинирование): объединение объекта с другими системами или устройствами.

- A - Adapt (Адаптация): приспособление конструкции к новым условиям эксплуатации.

- M - Modify (Модификация): изменение формы, размеров, параметров и характеристик.

- P – Put to other uses (Другое применение): поиск новых областей и способов применения.

- E - Eliminate (Исключение): исключение ненужных элементов или оптимизация конструкции.

- R - Reverse/Rearrange (Перестановка): изменение последовательности, расположения элементов или режима работы.

В отличие от традиционного анализа оборудования, при котором основное внимание уделяется его устройству и принципу действия, SCAMPER ориентирует студентов на постановку проблемных вопросов и поиск альтернативных решений. Использование данной методики позволяет объединить знания по теплопередаче, гидравлике, материаловедению и конструированию аппаратов в единый процесс решения учебной инженерной задачи [2].

Для изучения возможностей применения SCAMPER было организовано учебно-практическое занятие по теме «Пластинчатый теплообменник». В эксперименте приняли участие 16 студентов. Работа проводилась в коллективной форме, что позволило объединить знания, предложения и идеи участников в процессе совместного решения инженерной задачи.

В качестве объекта изучения был выбран пластинчатый теплообменник, широко применяемый в теплоэнергетике, пищевой, химической и других отраслях промышленности (рисунок 1).

Выбор данного аппарата связан с его конструкцией и возможностью её совершенствования. При изучении теплообменника можно рассмотреть различные варианты изменения конструкции, например формы и расположения пластин, площади теплообмена, направления движения теплоносителей и условий работы аппарата.

Пластинчатый теплообменник представляет собой разновидность рекуперативного теплообменного аппарата, в котором поверхностью теплопередачи служит пакет тонких профилированных металлических пластин. Два теплоносителя с различной температурой движутся по чередующимся каналам пакета. При этом одна среда отдаёт тепло, другая его получает, а металлические пластины обеспечивают разделение потоков. Отличительной особенностью аппарата является высокая удельная поверхность теплообмена при

относительно компактных габаритах. Профилирование пластин способствует интенсификации движения теплоносителей и повышению эффективности теплопередачи [11,8,2].

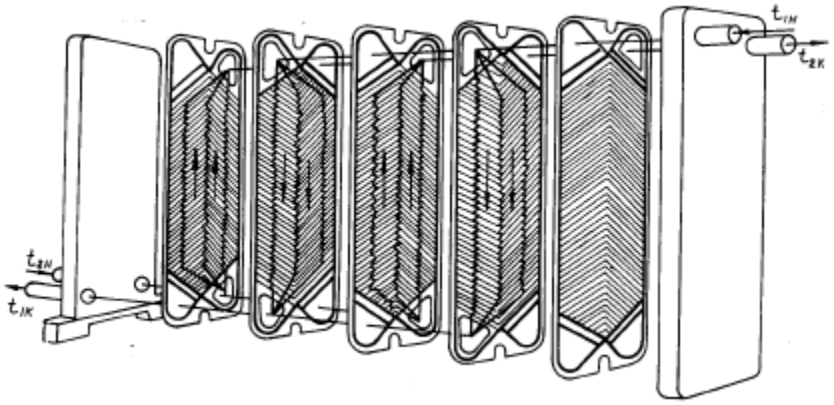


Рисунок 1. Пластинчатый теплообменник

В учебной работе приняли участие 16 студентов. Сначала преподаватель познакомил студентов с конструкцией пластинчатого теплообменника, объяснил принцип его работы и назначение основных частей. Затем студентам было предложено подумать, как можно улучшить данный аппарат, изменить его конструкцию и расширить возможности применения.

Для выполнения задания использовалась таблица 1 с семью направлениями методики SCAMPER и соответствующими вопросами. Студенты совместно обсуждали каждый вопрос, высказывали свои предложения и искали возможные варианты совершенствования теплообменника.

После обсуждения все предложения были объединены в одну общую таблицу (таблица 2). Затем был проведён анализ полученных ответов и рассмотрено их соответствие направлениям SCAMPER.

Таким образом, в ходе занятия студенты не только изучали устройство и принцип работы пластинчатого теплообменника, но и самостоятельно предлагали идеи по его совершенствованию. Применение методики SCAMPER позволило организовать коллективную работу и привлечь студентов к активному участию в изучении технического оборудования.

Для проведения занятия была подготовлена таблица 1 с семью направлениями методики SCAMPER. К каждому направлению были составлены вопросы, которые помогали студентам подумать о том, что можно изменить в пластинчатом теплообменнике и как улучшить его работу.

Таблица 1. Вопросы для изучения пластинчатого теплообменника по методике SCAMPER

Направление SCAMPER	Направляющий вопрос
S - Substitute	Какие части аппарата можно заменить?
C - Combine	С чем можно объединить аппарат?
A — Adapt	Как можно приспособить аппарат к другим условиям работы?
M - Modify	Что можно изменить в конструкции аппарата?

P - Put to other uses	Где ещё можно использовать аппарат?
E - Eliminate	Какие части можно убрать или упростить?
R - Reverse/Rearrange	Что можно изменить в расположении частей или работе аппарата?

Результаты и обсуждение

В результате проведенного учебного занятия 16 студентов совместно сформировали таблицу инженерных предложений по семи направлениям методики SCAMPER. Основные предложения представлены в таблице 2.

Таблица 2. Обобщённые предложения студентов по совершенствованию пластинчатого теплообменника

Направление SCAMPER	Предложения студентов
S - Substitute Какие элементы конструкции можно заменить?	Заменить пластинчатый теплообменник кожухотрубчатым или спиральным теплообменником.
C - Combine С чем можно объединить?	Объединить пластинчатый теплообменник с системой теплового насоса.
A - Adapt Как приспособить аппарат к другим технологическим условиям? (Приспособление)	Использовать аппарат для нагревания, охлаждения, испарения и конденсации.
M - Modify (Изменение) Как можно улучшить?	Использовать съёмные пластины, чтобы было легче очищать и обслуживать аппарат.
P - Put to other uses (Другое применение) В каких других технологических процессах можно применять пластинчатый теплообменник	Рассмотреть возможность использования аппарата в пищевой и химической промышленности.
E - Eliminate \(Исключение) Какие элементы конструкции можно исключить или упростить?	Изменять направление движения теплоносителей для изменения режима работы.
R - Reverse/Rearrange Что можно изменить в расположении элементов конструкции или в режиме работы аппарата?	Увеличить площадь теплообмена и одновременно уменьшить размеры аппарата.

В ходе обсуждения студенты предложили несколько вариантов изменения конструкции и функциональных характеристик пластинчатого теплообменника. Среди них были рассмотрены возможность использования других типов теплообменных аппаратов, интеграция с тепловым насосом, применение съёмных пластин, изменение схемы движения теплоносителей и расширение областей промышленного применения.

Качественный анализ показал, что отдельные предложения первоначально были отнесены студентами не к тем направлениям SCAMPER, которым они соответствуют по своему содержанию. Например, изменение направления движения теплоносителей было первоначально указано в категории Eliminate, хотя по смыслу оно относится к Reverse/ Rearrange. Аналогично предложение об увеличении площади теплообмена при одновременном уменьшении габаритов аппарата целесообразнее относить к Modify.

Данные несоответствия свидетельствуют о том, что использование SCAMPER предполагает не только генерацию идей, но и последующую классификацию, технический анализ и обоснование предложенных решений.

Особенностью проведённой работы стало рассмотрение пластинчатого теплообменника с различных конструктивных и функциональных позиций. Студенты анализировали возможность замены отдельных решений, объединения оборудования с другими системами, адаптации к различным технологическим условиям и изменения эксплуатационных характеристик.

Полученные результаты позволяют выделить несколько педагогических возможностей применения методики SCAMPER в преподавании технических дисциплин.

Во-первых, методика способствует активизации познавательной деятельности студентов, поскольку предполагает самостоятельное рассмотрение технического объекта и формулирование вопросов о возможных способах его совершенствования.

Во-вторых, коллективное обсуждение позволяет объединить различные идеи и точки зрения участников, формируя навыки взаимодействия, аргументации и совместного решения инженерных задач.

В-третьих, применение направляющих вопросов способствует интеграции теоретических знаний с практическим анализом промышленного оборудования.

При этом студенты получают возможность использовать знания по теплопередаче, гидравлике и конструированию для рассмотрения конкретных технических проблем.

Важным результатом является также развитие навыков критического анализа. Не все предложенные студентами решения автоматически являются технически обоснованными или практически реализуемыми. Поэтому необходимо дополнительно оценивать их с учётом теплотехнических характеристик, гидравлического сопротивления, прочности, герметичности и условий эксплуатации оборудования.

Таким образом, методика SCAMPER может выступать не только инструментом генерации творческих идей, но и средством организации учебной инженерной деятельности, направленной на анализ и совершенствование технических объектов.

Заключение

В работе рассмотрены возможности применения методики SCAMPER в преподавании технических дисциплин на примере изучения конструкции и принципа действия пластинчатого теплообменника.

В учебном эксперименте приняли участие 16 студентов, которые в процессе коллективного обсуждения сформировали общую таблицу инженерных предложений по семи направлениям SCAMPER. Предложения касались замены оборудования, его объединения с тепловым насосом, адаптации к различным технологическим процессам, совершенствования конструкции, расширения областей применения и изменения схемы движения теплоносителей.

Проведённый качественный анализ показал, что методика позволяет организовать коллективную творческую деятельность и стимулировать студентов к рассмотрению технического оборудования с различных конструктивных и функциональных позиций. Вместе с тем выявленные несоответствия при классификации отдельных предложений подчёркивают необходимость дополнительного технического обоснования и анализа генерируемых идей.

Полученные результаты свидетельствуют о педагогическом потенциале SCAMPER как инструмента развития творческого и инженерного мышления, самостоятельности и навыков коллективного решения практико-ориентированных задач.

Методика может применяться при преподавании различных технических дисциплин, особенно при изучении промышленного оборудования, технологических процессов и конструктивных особенностей инженерных систем. Её использование способствует интеграции теоретических знаний с практической подготовкой будущих инженеров.

Список литературы

1. Гуслова М.Н. Инновационные педагогические технологии: учебное пособие. – М.: Академия, 2010. – 287 с.
2. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Альянс, 2004. – 750 с.
3. Криони Н.К. Инноватика и инновационные образовательные технологии: учебное пособие. – М.: РосНОУ, 2020. – 296 с.
4. Applying project-based learning and SCAMPER teaching strategies in engineering education to explore the influence of creativity on cognition, personal motivation, and personality traits // Thinking Skills and Creativity. – 2020. – Т. 35. – Art. 100631. – DOI: 10.1016/j.tsc.2020.100631.
5. Eberle R.F. Developing Imagination Through Scamper // The Journal of Creative Behavior. – 1972. – Т. 6, № 3. – P. 199–203. – DOI: 10.1002/j.2162–6057.1972.tb00929.x.
6. Eberle B. Scamper: Games for Imagination Development. Waco, TX: Prufrock Press. – 1996. – 42 P.
7. Felder R.M., Brent R. Designing and Teaching Courses to Satisfy the ABET Engineering Criteria // Journal of Engineering Education. – 2003. – Т. 92, № 1. – P. 7–25. – DOI: 10.1002/j.2168–9830.2003.tb00734.x.
8. Kakaç S., Liu H., Pramuanjaroenkij A. Heat Exchangers: Selection, Rating, and Thermal Design. 4th ed. – Boca Raton: CRC Press, 2020. – 546 P.
9. Osborn A.F. Applied Imagination: Principles and Procedures of Creative Thinking. – New York: Charles Scribner's Sons, 1953. – 317 P.
10. Prince M. Does Active Learning Work? A Review of the Research // Journal of Engineering Education. – 2004. – Т. 93, № 3. – P. 223–231. – DOI: 10.1002/j.2168–9830.2004.tb00809.x.
11. Shah R.K. Sekulić D.P. Fundamentals of Heat Exchanger Design. Hoboken: John Wiley & Sons. XXXII. – 2003. – 941 P. – DOI: 10.1002/9780470172605.

References

1. Guslova M.N. Innovatsionnye pedagogicheskie tekhnologii [Innovative Pedagogical Technologies]: Textbook. Moscow: Akademiya. – 2010. – 287 P.
2. Kasatkin A.G. Osnovnye protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii. – M.: Alyans, 2004. – 750 P.

3. Krioni N.K. Innovatika i innovatsionnye obrazovatelnye tekhnologii [Innovation Studies and Innovative Educational Technologies]: Textbook. Moscow: RosNOU. – 2020. – 296 P.
4. Wu, T.-T. & Wu, Y.-T. Applying project-based learning and SCAMPER teaching strategies in engineering education to explore the influence of creativity on cognition, personal motivation, and personality traits. Thinking Skills and Creativity, 35, Article 100631. – 2020.
5. [Электронный ресурс]. – URL: https://doi.org/10.1016/j.tsc.2020.100631.
6. Eberle R.F. Developing Imagination Through Scamper // The Journal of Creative Behavior. – 1972. – Vol. 6, No. 3. – P. 199–203. – DOI: 10.1002/j.2162–6057.1972.tb00929.x.
7. Eberle B. Scamper: Games for Imagination Development. Waco, TX: Prufrock Press. – 1996. – 42 P.
8. Felder R.M., Brent R. Designing and Teaching Courses to Satisfy the ABET Engineering Criteria // Journal of Engineering Education. – 2003. – Vol. 92, No. 1. – P. 7–25. – DOI: 10.1002/j.2168–9830.2003.tb00734.x.
9. Kakaç S., Liu H., Pramuanjaroenkij A. Heat Exchangers: Selection, Rating, and Thermal Design. 4th ed. – Boca Raton: CRC Press, 2020. – 546 P.
10. Osborn A.F. Applied Imagination: Principles and Procedures of Creative Thinking. – New York: Charles Scribner's Sons, 1953. – 137 P.
11. Prince M. Does Active Learning Work? A Review of the Research // Journal of Engineering Education. – 2004. – Vol. 93, No. 3. – P. 223–231. – DOI: 10.1002/j. 2168–9830.2004.tb00809.x.
12. Shah R.K. Sekulić D.P. Fundamentals of Heat Exchanger Design. Hoboken: John Wiley & Sons.XXXII. – 2003. – 941 P. – DOI: 10.1002/9780470172605.

Статья поступила в редакцию: 10.11.2026
Статья принята к публикации: 16.11.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 661.728

Получение микрокристаллической целлюлозы из хлопкового линта и сравнение с другим растительным сырьём

Сайдалиев Кодиржон Косимжонович
PhD, доц.
кафедры Общая и биологическая химия, Андижанский филиал Кокандского университета
Республика Узбекистан, г. Андижан
E-mail: mashhurbek1212@gmail.com

Муслимова Индира Махамат Марселевна
преподаватель кафедры «Общая и биологическая химия»
Андижанский филиал Кокандского университета
Республика Узбекистан, г. Андижан

Preparation of microcrystalline cellulose from cotton linter and comparison with other plant raw materials

Saidaliev Kodirjon Kosimjonovich
PhD, Associate Professor
of the Department of General and Biological Chemistry, Andijan Branch of Kokand University
Uzbekistan, Andijan

Muslimova Indira Mahamat Marselevna
lecturer of the Department of General and Biological Chemistry Andijan Branch of Kokand University
Uzbekistan, Andijan

Аннотация

Работа посвящена получению микрокристаллической целлюлозы (МКЦ) из хлопкового линта–крупнотоннажного вторичного продукта хлопкоочистительных предприятий Республики Узбекистан. Проведено сопоставление физико-химического состава линта с другими видами растительного сырья: кокосовым волокном, кожурой плодов какао и соломой тефа. Исходным сырьём служил линт средневолокнистого хлопчатника сорта АН-35 с исходной зольностью 1,40 % и содержанием α-целлюлозы 94,60 %. Технологический процесс включал предварительную деминерализацию раствором сульфата калия-алюминия $KAl(SO_4)_2$ с добавлением поверхностно-активного вещества ОП-7, щелочную варку в автоклаве при температуре 140^0C в присутствии силиката натрия и последующий кислотный гидролиз 6 % раствором соляной кислоты при 98°C. Выход технической целлюлозы составил 90 – 92 % от массы сухого линта, а выход целевой МКЦ – 88 – 90 % от массы целлюлозы

Библиографическое описание: Сайдалиев К.К., Муслимова И.М.М. Получение микрокристаллической целлюлозы из хлопкового линта и сравнение с другим растительным сырьём // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23764

(сквозной выход 79 – 83 % в пересчёте на исходный линт). Комплексная предобработка позволила снизить зольность волокна до 0,03 % и повысить содержание α-целлюлозы до 99,3 %. Готовая микрокристаллическая целлюлоза охарактеризована степенью полимеризации 150 – 170 и влажностью 4,2 %, что удовлетворяет фармакопейным требованиям по степени полимеризации и влажности, предъявляемым к вспомогательным веществам для прямого прессования таблеток; остаточная зольность продукта (0,20 %) превышает фармакопейный предел и требует дополнительной оптимизации стадии промывки

Abstract

This research is devoted to the preparation of microcrystalline cellulose (MCC) from cotton linter, a large-tonnage secondary byproduct of cotton ginning enterprises in the Republic of Uzbekistan. A comparative study of the physicochemical composition of cotton linter and other types of agricultural residues (coconut fiber, cocoa pod husk, and teff straw) is presented. Linter of medium-staple cotton variety AN-35 with an initial ash content of 1.40 % and α-cellulose content of 94.60 % served as raw material. The processing method included chemical demineralization with potassium alum KAl(SO4)2 solution containing OP-7 surfactant, autoclave alkaline cooking at 140 °C with sodium silicate, and subsequent acid hydrolysis with 6 % hydrochloric acid at 98 °C. The yield of technical cellulose reached 90 – 92 % based on dry linter mass, and the target MCC yield was 88 – 90 % based on cellulose (an overall yield of 79 – 83 % relative to raw linter). Pretreatment reduced fiber ash content to 0.03 % and increased α-cellulose content to 99.3 %. The prepared MCC exhibited a degree of polymerization of 150 – 170 and moisture content of 4.2 %, meeting the pharmacopoeial limits for degree of polymerization and moisture set for direct compression tablet excipients; the residual ash content (0.20 %) exceeds the pharmacopoeial limit and requires further optimization of the washing stage.

Ключевые слова: микрокристаллическая целлюлоза, хлопковый линт, отходы хлопкоочистительной промышленности, кислотный гидролиз, щелочная варка, степень полимеризации, вспомогательное фармацевтическое вещество.

Keywords: microcrystalline cellulose, cotton linter, cotton ginning waste, acid hydrolysis, alkaline cooking, degree of polymerization, pharmaceutical excipient.

Введение

Целлюлоза служит основным строительным материалом клеточной стенки растений. Это нетоксичный, биоразлагаемый и возобновляемый биополимер, один из самых распространённых в природе [3]. Общая формула целлюлозы–(C6H10O5)n, где n представляет собой степень полимеризации. В небольших количествах целлюлоза встречается в клеточной стенке некоторых микроорганизмов, однако основную её массу образуют ткани высших растений [3].

Микрокристаллическую целлюлозу (МКЦ) получают контролируемой частичной деполимеризацией природной целлюлозы растворами минеральных кислот. Свойства готового продукта существенно зависят от вида исходного растительного сырья и параметров технологического процесса, вследствие чего МКЦ различных промышленных марок не являются взаимозаменяемыми [13]. Молекулярная масса МКЦ варьирует в диапазоне

30000-50000 г/моль при истинной плотности 1,538 – 1,544 г/см³. В воде, разбавленных растворах кислот и большинстве органических растворителей биополимер не растворяется, а в разбавленных растворах щелочей набухает [13].

Основной областью промышленного применения МКЦ выступает фармацевтическая технология. При получении твёрдых лекарственных форм методом прямого прессования таблеток МКЦ служит универсальным связующим веществом и сухим наполнителем, а благодаря развитой капиллярно-пористой структуре обеспечивает быстрое диспергирование и распадаемость таблеток [13]. Кроме того, микрокристаллическая целлюлоза широко востребована в пищевой промышленности в качестве стабилизатора эмульсий, загустителя и агента против слёживания, а также в рецептурах косметических средств [3].

Переход от нативной целлюлозы к микрокристаллической сопровождается деструкцией макромолекулярных цепей. Если у исходной хлопковой целлюлозы степень полимеризации достигает 10000 мономерных звеньев, то для МКЦ фармацевтического назначения фармакопейный норматив ограничивает этот показатель значением 350, что служит главным идентификационным признаком МКЦ в отличие от обычной порошковой целлюлозы. Кислотный гидролиз избирательно разрушает аморфные участки волокна, тогда как плотно упакованные кристаллические домены проявляют высокую устойчивость, благодаря чему кристалличность конечного продукта повышается до 60 – 80 % [13].

В современной практике сырьём для выделения целлюлозы служат различные растительные остатки агропромышленного комплекса. В частности, из соломы эфиопского злака тефа (Eragrostis tef) выделяют до 35,2 % целлюлозы и 27,2 % МКЦ со степенью полимеризации 241 – 257 [6]. Кожура плодов какао (Theobroma cacao) составляет 67 – 76 % массы свежего плода и содержит комплекс полисахаридов, из которых выделяют α-целлюлозу многостадийной обработкой кислотами, щелочами и гипохлоритом натрия [3, 7]. Из кокосового волокна после щелочной делигнификации и кислотного гидролиза 2,5 н. соляной кислотой также получают МКЦ с высокой кристалличностью [10]; кокосовое волокно служит сырьём и для получения наноцеллюлозы [8]. Сравнительные данные по составу сырья обобщены в таблице 1.

Таблица 1. Состав некоторых целлюлозосодержащих растительных остатков

Сырьё	**Целлюлоза, %**	**Гемицеллю-лоза, %**	**Лигнин, %**	**Зола, %**	**Источ-ник**
Кокосовое волокно	42,95*	29,56	22,77	-	[5, 6]
Кожура плодов какао	19-48	8,7-12,8	14-28	11,3	[1, 4]
Солома тефа	41,8	38,0	17,0	-	[3, 7]
Хлопковый линт, сорт АН-35	94,60*	0,6**	1,57	1,40	[8]

** Для кокосового волокна и линта указано содержание α-целлюлозы, для кожуры какао и соломы тефа-общее содержание целлюлозы. ** Сумма β- и γ-целлюлозы.*

В зерновых культурах гемицеллюлозы представлены преимущественно ксиланами, а содержание лигнина составляет 17 – 30 % [12, 11, 5]. В исследованном хлопковом линте сорта АН-35 содержание α-целлюлозы составляет 94,60 % при рекордно низком содержании лигнина (1,57 %) [2]. Превосходство линта по запасу чистой целлюлозы и малое количество примесей определили выбор данного вторичного ресурса в качестве базового сырья.

Цель настоящей работы-разработка технологических стадий получения микрокристаллической целлюлозы из вторичного линта хлопчатника сорта АН-35 и комплексная оценка соответствия готового продукта фармакопейным требованиям.

Материалы и методы

Сырьё и реагенты. В работе использовали линт средневолокнистого хлопчатника сорта АН-35 (II тип, I сорт), являющийся побочным продуктом хлопкоочистительных заводов Республики Узбекистан. Исходный линт характеризовался средней длиной волокна 7,30 мм, коэффициентом зрелости 94,70 и общей зольностью 1,40 %. Массовая доля компонентов волокна: α-целлюлоза – 94,60 %, β-целлюлоза – 0,10 %, γ-целлюлоза – 0,50 %, лигнин-1,57 %, жировосковые вещества-0,80 %. Исходная степень полимеризации волокна по медно-аммиачному раствору составляла 3000. Содержание остаточных минеральных элементов: железо-41 мг/кг, кальций-1315 мг/кг, кремний-835 мг/кг [2]. Для химической обработки применяли гидроксид натрия ч.д.а., силикат натрия Na_2SiO_3 ч.д.а., соляную кислоту ч.д.а., калиево-алюминиевые квасцы $KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ ч.д.а. и неионогенное ПАВ марки ОП-7.

Методика предварительной деминерализации и щелочной варки. Хлопковый линт очищали от пыли и сорных механических примесей, после чего подрезали на дисковой мельнице до длины волокна 2 мм. Для снижения исходной зольности навеску линта обрабатывали 3 % водным раствором $KAl(SO_4)_2$ при температуре 70 ^{0}C в течение 45 мин с добавлением 0,3 % ПАВ ОП-7 от массы сухого волокна. Щелочную варку деминерализованного линта проводили в лабораторном автоклаве ёмкостью 1 кг. Навеску линта массой 500 г помещали в варочный автоклав и заливали раствором при гидромодуле ванны 16:1. Варочный раствор содержал 2 % NaOH, 2 % Na_2SiO_3 (ингибитор термоокислительной деструкции) и 0,3 % ОП-7 от массы воздушно-сухого волокна. За 50 мин автоклав нагревали до рабочей температуры 140 ^{0}C и выдерживали при постоянном перемешивании в течение 4,5 ч. По завершении варки волокнистую массу отделяли от отработанного чёрного щёлока, тщательно промывали дистиллированной водой до нейтральной реакции фильтрата (по универсальному индикатору) и сушили при 105 °C до постоянной массы.

Кислотный гидролиз и методы анализа. Полученную техническую хлопковую целлюлозу подвергали гетерогенному кислотному гидролизу в термостатированном реакторе с обратным холодильником. В серии оптимизационных испытаний варьировали концентрацию соляной кислоты от 2 до 10 %; наилучший комплекс характеристик был достигнут при использовании 6 % раствора HCl, что согласуется с диапазоном концентраций, применяемым в классических методиках кислотного гидролиза целлюлозы [4, 1]. Гидролиз вели при температуре 98 ^{0}C и гидромодуле 15:1 в течение 60 мин. Образовавшуюся тонкодисперсную суспензию МКЦ немедленно разбавляли трёхкратным объёмом холодной

дистиллированной воды для остановки реакции гидролиза, отделяли фильтрацией на воронке Бюхнера, отмывали до отсутствия ионов Cl^- (проба с 0,1 М $AgNO_3$), высушивали при 60 °С и измельчали.

Определение содержания α-целлюлозы проводили по стандартной методике растворения в 17,5 % NaOH. Среднюю степень полимеризации определяли вискозиметрическим методом в медно-аммиачном растворе. Содержание железа, кальция и кремния устанавливали методом атомно-абсорбционной спектрометрии. Содержание альдегидных групп определяли йодометрическим методом, карбоксильных групп-кальций-ацетатным методом. Влажность и общую зольность определяли гравиметрически по методикам фармакопеи USP [9].

Результаты и обсуждение

В результате предварительной кислотно-солевой обработки и автоклавной щелочной варки хлопкового линта была получена высокоочищенная техническая целлюлоза. Выход очищенной целлюлозы составил 90 – 92 % от массы абсолютно сухого исходного линта (900 – 920 г на 1 кг сырья). Изменение основных физико-химических показателей волокна представлено в таблице 2.

Таблица 2. Изменение показателей линта сорта АН-35 после предобработки и щелочной варки

Показатель	Исходный линт	Полученная целлюлоза
Массовая доля α-целлюлозы, %	94,60	99,30
Общая зольность, %	1,40	0,03
Содержание железа, мг/кг	41	3
Содержание кальция, мг/кг	1315	60
Содержание кремния, мг/кг	835	5
Средняя степень полимеризации	3000	1150-1350

Данные таблицы 2 свидетельствуют, что сочетание кислотно-солевой деминерализации раствором $KAl(SO_4)_2$ и щелочной варки в присутствии Na_2SiO_3 и ПАВ ОП-7 обеспечивает практически исчерпывающее удаление сопутствующих нецеллюлозных компонентов и силикатных примесей. Остаточное содержание кремния снизилось в 167 раз, кальция-почти в 22 раза, железа-в 14 раз. В результате интегральная зольность волокнистого полуфабриката упала с 1,40 до 0,03 %, а доля высокомолекулярной α-целлюлозы возросла с 94,60 до 99,30 %, то есть содержание низкомолекулярных фракций (β- и γ-целлюлозы) и сопутствующих веществ снизилось до долей процента. Степень полимеризации при этом снизилась с 3000 до 1150 – 1350.

Последующий кислотный гидролиз технической целлюлозы 6 % соляной кислотой при температуре 98 ^{0}С в течение 60 мин привёл к избирательному гидролитическому расщеплению гликозидных связей в аморфных зонах фибрилл. Выход целевой микрокристаллической целлюлозы составил 88 – 90 % от массы очищенной целлюлозы, что соответствует сквозному выходу 79 – 83 % в расчёте на исходную сухую массу хлопкового

линта. Для сравнения, выход МКЦ из соломы тефа при аналогичном гидролизе не превышает 27,2 % [6]. Почти трёхкратное преимущество хлопкового линта объясняется высоким стартовым содержанием целлюлозы и отсутствием необходимости в агрессивной отбелке.

Свойства синтезированной МКЦ сопоставлены с нормативными фармакопейными требованиями к фармацевтическим наполнителям прямого прессования в таблице 3.

Таблица 3. Характеристики полученной МКЦ и требования к продукту фармацевтического назначения

Показатель	Полученная МКЦ	Требование USP-NF*
Средняя степень полимеризации	150-170	не более 350
Потеря массы при высушивании, %	4,2	не более 7,0
Общая зольность, %	0,20	не более 0,10
Истинная плотность, г/см³	1,527	не нормируется
Содержание альдегидных групп (-CHO), %	0,035	не нормируется
Содержание карбоксильных групп (-COOH), %	0,16	не нормируется

** Нормируемые значения приведены по монографии USP-NF [9] и обзору [13].*

Полученный продукт укладывается в фармакопейные нормативы по степени полимеризации (150 – 170 при лимите не выше 350) и влажности (4,2 % при норме до 7,0 %). Степень полимеризации 150 – 170 свидетельствует о достижении предельной степени полимеризации (level-off degree of polymerization, LODP), характерного для гидролиза хлопковой целлюлозы [13]. Влажность 4,2 % оптимальна и соответствует равновесному влагосодержанию МКЦ при стандартных условиях хранения.

Вместе с тем общая зольность образца составила 0,20 %, что вдвое превышает допустимый фармакопейный предел (0,10 %). Данное превышение связано либо с неполным удалением сорбированных ионов алюминия после стадии деминерализации квасцами, либо с недостаточной отмывкой высокодисперсного порошка от хлорид-ионов после гидролиза. Для внедрения технологии в фармацевтический сектор на последующих этапах исследований требуется оптимизация режима деионизации и введение стадии финишной промывки обессоленной водой.

Заключение

Разработан эффективный способ глубокой переработки хлопкового линта сорта АН-35 в микрокристаллическую целлюлозу. Благодаря высокому исходному содержанию α-целлюлозы (94,60 %) и низкому содержанию лигнина (1,57 %) линт обеспечивает рекордный сквозной выход целевой МКЦ на уровне 79 – 83 % без необходимости проведения экологически вредных хлорных отбелок.

Полученная микрокристаллическая целлюлоза по молекулярно-массовым параметрам (степень полимеризации 150 – 170) и равновесной влажности (4,2 %) соответствует фармакопейным требованиям к наполнителям для прямого прессования. Устранение повышенной остаточной зольности (0,20 %) является ключевой задачей дальнейших технологических исследований, что позволит организовать импортозамещающее производство высококачественной МКЦ на базе отечественных отходов хлопкопереработки.

Список литературы

1. Ступиньская Х., Иллер Э., Зимек З. и др. Stupińska H., Iller E., Zimek Z. et al. An environment-friendly method to prepare microcrystalline cellulose // Fibres & Textiles in Eastern Europe. – 2007. – Т. 15, № 5–6. – P. 167–172.
2. У.М. Турдиалиев, А.Н. Кадыров, Г.А. Умарова, К.К. Сайдалиев. Микрокристаллическая целлюлоза из хлопка-сырца Узбекистана // Universum: технические науки. – 2020. – № 9–2 (78). – С. 75–77.
3. Adeleye O.A., Bamiro O.A., Albalawi D.A. et al. Characterizations of Alpha-Cellulose and Microcrystalline Cellulose Isolated from Cocoa Pod Husk as a Potential Pharmaceutical Excipient // Materials. – 2022. – Т. 15, № 17. – Art. 5992. – P. 1–18. – DOI: 10.3390/ma15175992.
4. Battista O.A., Smith P.A. Microcrystalline cellulose // Industrial & Engineering Chemistry. – 1962. – Т. 54, № 9. – P. 20–29. – DOI: 10.1021/ie50633a003.
5. G. Dorez, L. Ferry, R. Sonnier, A. Taguet. Effect of cellulose, hemicellulose and lignin contents on pyrolysis and combustion of natural fibers // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. – 2014. – Т. 107. – P. 323–331. – DOI: 10.1016/j.jaap.2014.03.017.
6. Getachew M., Gabriel T., Belete A., Gebre-Mariam T. Extraction and Characterization of Cellulose and Microcrystalline Cellulose from Teff Straw and Evaluation of the Microcrystalline Cellulose as Tablet Excipient // Journal of Natural Fibers. – 2023. – Т. 20, № 2. – Art. 2245565. – P. 1–15. – DOI: 10.1080/15440478.2023.2245565.
7. Hozman-Manrique A.S., Garcia-Brand A.J., Hernández-Carrión M., Porras A. Isolation and Characterization of Cellulose Microfibers from Colombian Cocoa Pod Husk via Chemical Treatment with Pressure Effects // Polymers. – 2023. – Т. 15, № 3. – Art. 664. – P. 1–17. – DOI: 10.3390/polym15030664.
8. L. Nurhayati, R.T. Minerva, D. Susanty [et al.]. Eco-Friendly Nanocellulose from Coconut Fiber: Optimizing Cellulase Enzymes for Sustainable Production // Asian Journal of Green Chemistry. – 2025. – Т. 9, № 1. – P. 115–128. – DOI: 10.48309/AJGC.2025.482498.1559.
9. Microcrystalline Cellulose: NF monograph // The United States Pharmacopeia 29 – The National Formulary 24 (USP 29-NF 24). – 2006.
10. Nasution H., Harahap H., Suherman P. Kelvin. Isolation and Characterization of Microcrystalline Cellulose from Coconut Fiber using Acid Hydrolysis Process // Proceedings of the International Conference of Science, Technology, Engineering, Environmental and Ramification Researches (ICOSTEERR. – 2018. – P. 222–226. – DOI: 10.5220/0010077802220226.
11. Ochilov A.I. Sellyulozaning kimyoviy xossalari va tuzilishi // Academic Research in Educational Sciences. – 2023. – Т. 4, № 3. – P. 144–150.
12. Tesfaw A.A., Tizazu B.Z. Reducing Sugar Production from Teff Straw Biomass Using Dilute Sulfuric Acid Hydrolysis: Characterization and Optimization Using Response Surface Methodology // International Journal of Biomaterials. – 2021. – Т. 2021. – Art. 2857764. – P. 1–12. – DOI: 10.1155/2021/2857764.

13. Thoorens G., Krier F., Leclercq B., Carlin B., Evrard B. Microcrystalline cellulose, a direct compression binder in a quality by design environment – A review // International Journal of Pharmaceutics. – 2014. – T. 473, № 1–2. – P. 64–72. – DOI: 10.1016/j.ijpharm.2014.06.055.

References

1. Stupińska H., Iller E., Zimek Z. et al. [An environment-friendly method to prepare microcrystalline cellulose] // Fibres & Textiles in Eastern Europe. – 2007. – Vol. 15, No. 5–6. – P. 167–172. (In Russ.).
2. Turdialiev, A.N. Kadyrov, G.A. Umarova, K.K. Saidaliyev. [Microcrystalline cellulose from raw cotton of Uzbekistan] // Universum: tekhnicheskie nauki. – 2020. – No. 9–2 (78). (In Russ.).
3. Adeleye O.A., Bamiro O.A., Albalawi D.A. et al. Characterizations of Alpha-Cellulose and Microcrystalline Cellulose Isolated from Cocoa Pod Husk as a Potential Pharmaceutical Excipient // Materials. – 2022. – Vol. 15, No. 17. – Art. 5992. – P. 1–18. – DOI: 10.3390/ma15175992.
4. Battista O.A., Smith P.A. Microcrystalline cellulose // Industrial & Engineering Chemistry. – 1962. – Vol. 54, No. 9. – P. 20–29. – DOI: 10.1021/ie50633a003.
5. G. Dorez, L. Ferry, R. Sonnier, A. Taguet. Effect of cellulose, hemicellulose and lignin contents on pyrolysis and combustion of natural fibers // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. – 2014. – Vol. 107. – P. 323–331. – DOI: 10.1016/j.jaap.2014.03.017.
6. Getachew M., Gabriel T., Belete A., Gebre-Mariam T. Extraction and Characterization of Cellulose and Microcrystalline Cellulose from Teff Straw and Evaluation of the Microcrystalline Cellulose as Tablet Excipient // Journal of Natural Fibers. – 2023. – Vol. 20, No. 2. – Art. 2245565. – P. 1–15. – DOI: 10.1080/15440478.2023.2245565.
7. Hozman-Manrique A.S., Garcia-Brand A.J., Hernández-Carrión M., Porras A. Isolation and Characterization of Cellulose Microfibers from Colombian Cocoa Pod Husk via Chemical Treatment with Pressure Effects // Polymers. – 2023. – Vol. 15, No. 3. – Art. 664. – P. 1–17. – DOI: 10.3390/polym15030664.
8. L. Nurhayati, R.T. Minerva, D. Susanty [et al.]. Eco-Friendly Nanocellulose from Coconut Fiber: Optimizing Cellulase Enzymes for Sustainable Production // Asian Journal of Green Chemistry. – 2025. – Vol. 9, No. 1. – P. 115–128. – DOI: 10.48309/AJGC.2025.482498.1559.
9. Microcrystalline Cellulose: NF monograph // The United States Pharmacopeia 29 – The National Formulary 24 (USP 29-NF 24). – 2006.
10. Nasution H., Harahap H., Suherman P. Kelvin. Isolation and Characterization of Microcrystalline Cellulose from Coconut Fiber using Acid Hydrolysis Process // Proceedings of the International Conference of Science, Technology, Engineering, Environmental and Ramification Researches (ICOSTEERR. – 2018. – P. 222–226. – DOI: 10.5220/0010077802220226.
11. Ochilov A.I. Sellyulozaning kimyoviy xossalari va tuzilishi // Academic Research in Educational Sciences. – 2023. – Vol. 4, No. 3. – P. 144–150.

12. Tesfaw A.A., Tizazu B.Z. Reducing Sugar Production from Teff Straw Biomass Using Dilute Sulfuric Acid Hydrolysis: Characterization and Optimization Using Response Surface Methodology // International Journal of Biomaterials. – 2021. – Vol. 2021. – Art. 2857764. – P. 1–12. – DOI: 10.1155/2021/2857764.
13. Thoorens G., Krier F., Leclercq B., Carlin B., Evrard B. Microcrystalline cellulose, a direct compression binder in a quality by design environment – A review // International Journal of Pharmaceutics. – 2014. – Vol. 473, No. 1–2. – P. 64–72. – DOI: 10.1016/j.ijpharm.2014.06.055.

Статья поступила в редакцию: 03.11.2026
Статья принята к публикации: 10.11.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 661.8+544.3

DOI: 10.32743/UniTech.2026.152.11.23720

Влияние концентрации гидроксида натрия и температуры абсорбции сероводорода на распределение фаз при получении сульфида натрия

Самадов Фаррух Хамзаевич
председатель правления АО «Навоиазот»
Республика Узбекистан, г. Навои – 5
Эркаев Актам Улашевич
проф.
Ташкентский химико-технологический институт
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Хакимов Саид Сувонович
начальник отдела технологий инноваций и локализации АО «Навоиазот»
Республика Узбекистан, г. Навои – 5
Вафоев Мухаммадали Мирзоевич
заместитель председателя правления АО «Навоиазот»
Республика Узбекистан, г. Навои – 5
E-mail: vafoyevmuxammadali@gmail.com
Бобокулов Акбар Носирович
доц.
Ташкентский химико-технологический институт
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: kafedranmkt@mail.ru
Кошанова Бибигул Турганбаевна
доц.
Ташкентский химико-технологический институт
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Туракулов Бехзод Бегматович
доц.
Ташкентский химико-технологический институт
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Эркаева Назокат Актамовна
доц.
Ташкентский химико-технологический институт
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Турсунова Дилдора Абдусатторовна
доц.
Ташкентский химико-технологический институт
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Библиографическое описание: Влияние концентрации гидроксида натрия и температуры абсорбции сероводорода на распределение фаз при получении сульфида натрия // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Самадов Ф.Х. [и др.]. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23720

Influence of sodium hydroxide concentration and hydrogen sulfide absorption temperature on phase distribution during the production of sodium sulfide

Samadov Farrux Xamzayevich
Chairman of the Management Board of Navoiyazot JSC
Republic of Uzbekistan, Navoi – 5
Erkaev Aktam Ulashevich
professor of the Tashkent Institute of Chemical Technology
Republic of Uzbekistan, Tashkent
Khakimov Said Suvonovich
Head of the Department of Technology, Innovation and Localization at Navoiazot JSC
Republic of Uzbekistan, Navoi – 5
Vafoyev Mukhammadali Mirzoyevich
Deputy Chairman of the Management Board of Navoiyazot JSC
Republic of Uzbekistan, Navoi – 5
Bobokulov Akbar Nosirovich
Associate Professor of the Tashkent Institute of Chemical Technology
Republic of Uzbekistan, Tashkent
Koshanova Bibigul Turgunbayevna
Associate Professor of the Tashkent Institute of Chemical Technology
Republic of Uzbekistan, Tashkent
Turakulov Behzod Begmatovich
Associate Professor of the Tashkent Institute of Chemical Technology
Republic of Uzbekistan, Tashkent
Erkayeva Nazokat Aktamovna
Associate Professor of the Tashkent Institute of Chemical Technology
Republic of Uzbekistan, Tashkent
Tursunova Dildora Abdusattorovna
Associate Professor of the Tashkent Institute of Chemical Technology
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

Цель исследования – установить влияние концентрации гидроксида натрия и температуры поглощения сероводорода на распределение жидкой и твёрдой фаз при получении сульфидсодержащего продукта, а также оценить дополнительное выделение осадка при охлаждении фильтрата. Рассмотрены результаты двенадцати опытов с исходными растворами NaOH концентрацией 30, 35 и 40 масс. % при температурах абсорбции 20, 40, 60 и 80 °C и продолжительности контакта 120 мин. После первичного фильтрования измеряли массы фаз; для полученных фильтратов учитывали вторичную кристаллизацию. Массовую долю твёрдой фазы рассчитывали по результатам взвешивания. Установлено, что увеличение концентрации NaOH при фиксированной температуре повышает долю первичного осадка, тогда как повышение температуры уменьшает её. Для 35 %-ного раствора NaOH при изменении температуры от 20 до 80 °C отношение масс жидкой и твёрдой фаз возрастало от 0,628 до 8,333, а доля твёрдой фазы уменьшалась с 61,43 до 10,72 %. При последующем охлаждении фильтрата доля вторичного осадка в суммарной массе выделенной твёрдой фазы возрастала с 3,85 до 88,35 %. Показано, что температурный режим перераспределяет нагрузку между стадиями абсорбции и кристаллизации. Полученные соотношения фаз могут

использоваться при предварительном выборе схемы разделения суспензии; химический и кристаллофазовый состав осадка требует отдельного подтверждения аналитическими методами.

Abstract

The aim of this study was to determine how the initial sodium hydroxide concentration and hydrogen sulfide absorption temperature affect liquid-solid phase distribution during the production of a sulfide-containing product, and to evaluate additional precipitation during subsequent cooling of the filtrate. Data from twelve experiments were analyzed using 30, 35, and 40 wt % NaOH solutions at absorption temperatures of 20, 40, 60, and 80 °C and a contact time of 120 min. The masses of the phases were measured after primary filtration, and secondary crystallization from the filtrates was evaluated. The mass fraction of the solid phase was calculated from the weighing data. Higher NaOH concentrations increased the fraction of the initial precipitate at a fixed temperature, whereas higher absorption temperatures reduced it. For 35 wt % NaOH, increasing the temperature from 20 to 80 °C increased the liquid-to-solid mass ratio from 0.628 to 8.333 and reduced the solid-phase fraction from 61.43 to 10.72 %. Upon subsequent filtrate cooling, the contribution of secondary precipitation to the total recovered solid increased from 3.85 to 88.35 %. These findings indicate that the thermal regime redistributes the solid-separation load between the absorber and the downstream crystallization stage. The observed phase ratios may support preliminary process design; however, the chemical composition and crystalline phases of the precipitate require separate analytical confirmation.

Ключевые слова: сульфид натрия, сероводород, гидроксид натрия, абсорбция, кристаллизация, соотношение фаз, фильтрат.

Keywords: sodium sulfide, hydrogen sulfide, sodium hydroxide, absorption, crystallization, phase ratio, filtrate.

Введение

Сероводородсодержащие газовые потоки образуются при переработке природного газа и других видов углеводородного сырья. Их очистка требует эффективного связывания H_2S, учитывающего состав газа, расход абсорбента и технологические параметры газожидкостного контакта. Основные процессы газоочистки и принципы выбора абсорбентов изложены в классических руководствах Д.М. Кемпбела и А.Л. Кохуля с Ф.С. Ризенфельдом [1, 2]. В современных исследованиях показано, что параметры щелочного поглощения определяют не только степень удаления H_2S, но и конкурирующую абсорбцию CO_2 [4-6, 10-12].

Для предприятий газоперерабатывающего комплекса Узбекистана практический интерес представляет химическая переработка извлекаемого сероводорода в товарные соединения серы. В частности, абсорбция H_2S раствором NaOH может рассматриваться как одна из стадий получения сульфидсодержащих растворов и твёрдых продуктов. При этом

сведения о производстве и обращении с элементарной серой необходимо отличать от экспериментально подтверждённых характеристик конкретной технологии; общие отраслевые данные систематизируются Геологической службой США [13].

Щелочное поглощение H_2S включает последовательное образование гидросульфидных и сульфидных частиц; их соотношение определяется, среди прочего, кислотно-основным состоянием раствора. В работе Raksajati и соавт. исследована селективность поглощения H_2S в смешанном абсорбенте NaOH-$NaHCO_3$-Na_2CO_3 [11]. Sobrinho и соавт. предложили модель динамики щелочной абсорбции, связывающую эффективность удаления H_2S с концентрацией NaOH, газовым расходом и изменением pH [12]. Показано также, что распределение подачи щёлочи между аппаратами влияет на удаление H_2S и расход реагента [6]. Эти результаты относятся к газожидкостному массообмену, но сами по себе не определяют массу кристаллов, образующихся в абсорбере.

Для получения твердого сульфидсодержащего продукта важен не только химический состав абсорбата, но и распределение фаз после реакции и при охлаждении раствора. В патенте RU 2813888 C1 описано получение гидросульфида натрия с последующей обработкой щёлочью и вакуумной сушкой с образованием низководного кристаллогидрата $Na_2S·(2-3)H_2O$ [3]. Промышленный пример получения растворов NaHS из кислого газа рассмотрен Liu и соавт. [9]. В настоящей работе исследована другая технологическая постановка: первичное выделение твёрдой фазы непосредственно после абсорбции и дополнительная кристаллизация при охлаждении фильтрата.

Результаты исследований щелочной газоочистки показывают, что эффективность удаления H_2S зависит от состава газовой смеси и режима контакта газовой и жидкой фаз [4, 5, 10]. Следовательно, выбор температуры в технологии получения сульфидсодержащего продукта должен учитывать не только условия абсорбции, но и последующую фильтрацию суспензии.

Альтернативное направление получения Na_2S связано с восстановлением сульфата натрия. В исследовании He и соавт. рассмотрено восстановление Na_2SO_4 водородом в псевдоожиженной системе и показана роль температуры и фазовых превращений в процессе [7]. Прямое сопоставление его энергетических показателей с рассматриваемой абсорбционной схемой без единой материально-энергетической базы некорректно.

Таким образом, в публикациях достаточно подробно изучены химическое поглощение сероводорода, селективность щелочных абсорбентов и отдельные маршруты производства сульфидов [3-12]. Вместе с тем для исследуемых исходных концентраций NaOH необходима количественная оценка распределения масс твёрдой и жидкой фаз между первичным фильтрованием и последующим охлаждением. Такая оценка важна для выбора рационального места кристаллизации в технологической схеме, но не заменяет исследования состава и структуры осадка.

Цель работы – оценить влияние концентрации NaOH (30-40 масс. %) и температуры абсорбции H_2S (20-80 °C) на массовое соотношение жидкой и твёрдой фаз, а также определить вклад охлаждения фильтрата в суммарное выделение осадка.

Материалы и методы

Проанализирована серия из 12 опытов с исходной массовой долей NaOH 30, 35 или 40 % при температурах абсорбции 20, 40, 60 и 80 °C. Продолжительность абсорбции составляла 120 мин. Согласно исходному лабораторному описанию, сероводород получали воздействием соляной кислоты на сульфидное сырьё; после холодильника газ направляли в последовательно расположенные абсорберы. Образовавшуюся суспензию фильтровали, охлаждали фильтрат и определяли массы жидкой и вторично выделившейся твёрдой фаз. Температура конечного охлаждения, время выдержки и методы химического анализа осадка в представленных исходных данных не уточнены; поэтому в статье рассматриваются измеренные массы фаз без экспериментального подтверждения конкретной кристаллогидратной формы.

При достаточном количестве щёлочи формальный суммарный стехиометрический баланс реакции описывается уравнением:

$$H_2S + 2NaOH \rightarrow Na_2S + 2H_2O. \quad (1)$$

В водной фазе одновременно могут присутствовать HS^- и S^{2-}, поэтому суммарное уравнение (1) не является доказательством чистоты выделенного осадка. Использовали отношение $R = m_ж/m_т$ и массовую долю первичной твёрдой фазы $\varphi_т = 100m_т/(m_ж + m_т) = 100/(1 + R)$, где $m_ж$ и $m_т$ - массы фильтрата и осадка после первичного разделения. Для двух стадий осаждения рассчитывали $m_{т,\Sigma} = m_{т,1} + m_{т,2}$ и вклад второй стадии $D_2 = 100m_{т,2}/m_{т,\Sigma}$. Массы, взятые после охлаждения, относятся к той же порции исходного фильтрата, но их сопоставление между опытами не позволяет судить о химическом выходе Na_2S без данных о количестве прореагировавшего H_2S. Схемы лабораторных установок приведены на рисунках 1 и 2.

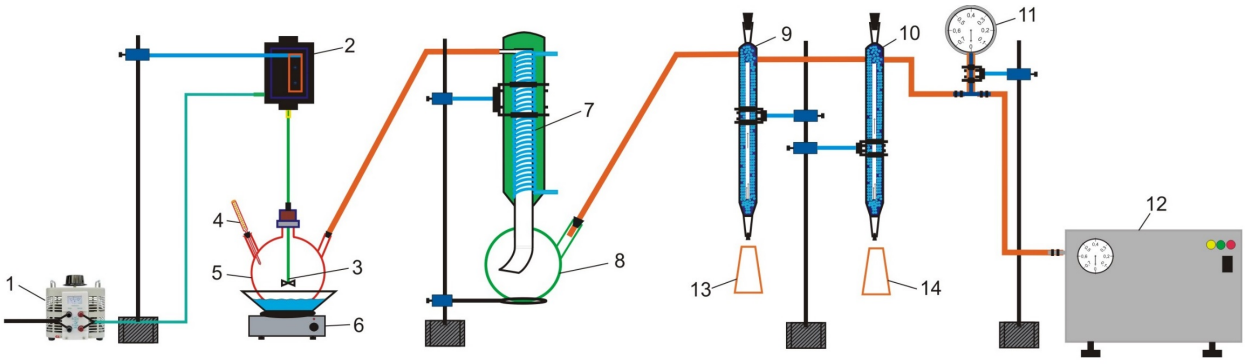


Рисунок 1. Лабораторная установка для абсорбционного получения сульфидсодержащего продукта из NaOH и H_2S

1 – ЛАТР; 2 – электродвигатель; 3 – мешалка; 4 – термометр; 5, 8 – круглодонные колбы; 6 – электроплитка; 7 – водяной холодильник; 9, 10 – абсорберы; 11 – манометр; 12 – вакуум-компрессор; 13, 14 – сборники жидкостей.

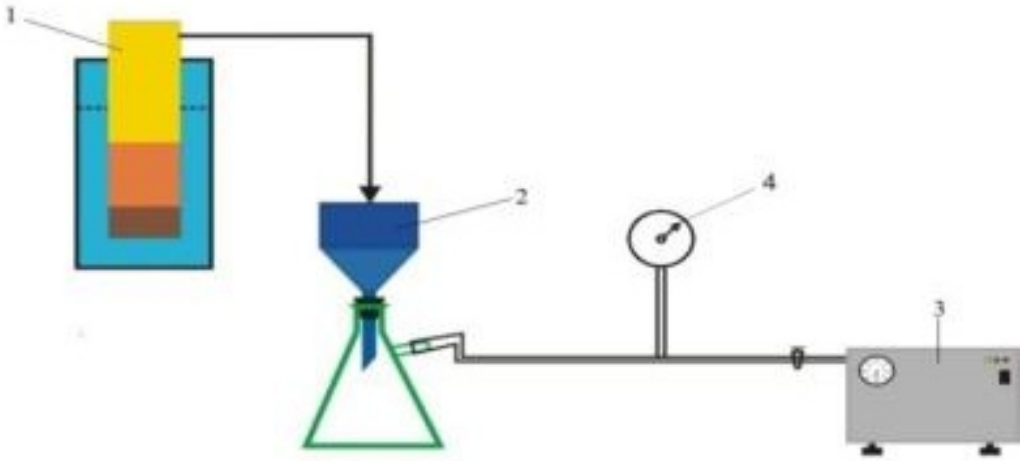


Рисунок 2. Лабораторная установка для фильтрования суспензии после абсорбции H_2S раствором NaOH

1 – ёмкость для подачи суспензии; 2 – фильтр; 3 – вакуум-насос; 4 – вакуумметр.

Результаты и обсуждение

В исходном описании экспериментов приведена оценка степени абсорбции 75-80 %. При этом метод её определения, расход подаваемого H_2S и результаты анализа химического состава осадка не представлены. По этой причине дальнейшее сопоставление вариантов основывается на непосредственных массовых измерениях жидкой и твёрдой фаз (табл. 1), а не на расчётном химическом выходе Na_2S.

После 120 мин абсорбции суспензию разделяли фильтрованием на первичный осадок и фильтрат. Затем фильтрат охлаждали, фиксируя массу вторичного осадка. Формула кристаллогидрата в приведённых таблицах не подтверждена результатами рентгенофазового анализа; поэтому далее используется нейтральное обозначение «твёрдая фаза».

Для каждого режима определяли отношение Ж:Т как при первичном фильтровании, так и после охлаждения фильтрата. Вторая стадия характеризуется перераспределением массы исходного фильтрата между новым осадком и маточным раствором.

Для 30 %-ного NaOH отношение Ж:Т первичной суспензии повышается с 20,222 при 20 °C до 183,654 при 60 °C, то есть в 9,08 раза. При 80 °C в данной серии первичный осадок не зафиксирован, поэтому отношение Ж:Т математически не определяется (табл. 1).

При 35 %-ном NaOH отношение Ж:Т увеличивается от 0,628 до 8,333, а при 40 %-ном – от 0,417 до 1,881 при повышении температуры абсорбции с 20 до 80 °C. Соответствующие уменьшения доли твёрдой фазы свидетельствуют о смещении распределения фаз в сторону жидкого продукта. Возможными причинами являются изменение растворимости и равновесия состава раствора; для доказательства конкретного механизма необходимы данные о концентрации Na_2S/NaHS и фазовом составе осадка.

При 35 %-ном NaOH и 20 °C масса первичной твёрдой фазы составляет 58,661 г при массе фильтрата 36,839 г. Это соответствует доле осадка 61,43 % и отношению Ж:Т = 0,628. При 80 °C первичный осадок уменьшается до 8,698 г (10,72 %), а отношение Ж:Т возрастает до 8,333.

Увеличение исходной концентрации NaOH от 30 до 40 % при одинаковой температуре сопровождается ростом доли первичной твёрдой фазы. Например, при 20 °C она возрастает с 4,71 до 70,57 %, а при 80 °C - от 0 до 34,71 %. Однако абсолютные массы первичного продукта сравнимы как показатели разных опытов только после учёта фактической массы исходной загрузки и поглощённого H_2S.

Таблица 1. Влияние концентрации NaOH и температуры абсорбции на распределение фаз и показатели фильтрования

№	NaOH, масс. %	Т, °С	Фильтрат, г	Осадок, г	Время фильтрования	Ж:Т	Фильтрат после охлаждения, г	Осадок после охлаждения, г	Ж:Т после охлаждения	Скорость фильтрации кг/(м² · ч)	
										По ж.ф.	По т.ф.
1	30	20	91,00	4,50	10:30	20,22	48,83	42,17	1,16	3394,80	2930,15
2		40	87,40	3,32	16:01	26,28	54,74	32,66	1,68	2448,00	1460,05
3		60	85,48	0,46	12:04	183,65	48,78	36,70	1,33	2899,66	2181,89
4		80	81,17	0	Осадок отсутствует	+	0	81,17	100 твердый	493,56	33,62
5	35	20	36,84	58,66	50:01	0,63	34,49	2,35	14,67	807,66	204,77
6		40	49,89	40,83	35:27	1,22	39,80	10,09	3,94	512,60	453,60
7		60	64,82	21,13	48:01	3,07	34,38	30,43	1,13	467,28	4719,92
8		80	72,48	8,70	10:00	8,33	6,53	65,95	0,10	474,70	182,59
9	40	20	28,10	67,40	30:60	0,42	20,30	7,81	2,60	289,94	198,32
10		40	39,64	51,08	58:10	0,77	23,54	16,10	1,46	2957,26	4840,06
11		60	44,67	41,28	04:10	1,08	16,94	27,73	0,61	1728,72	2230,70
12		80	53,00	28,18	09:58	1,88	23,14	29,86	0,77	3394,80	2930,15

Повышение температуры при исходной концентрации NaOH 30 % сопровождается уменьшением массовой доли первичного осадка с 4,71 % при 20 °C до 0,54 % при 60 °C; при 80 °C первичная твёрдая фаза отсутствует. Для NaOH 35 % соответствующая доля уменьшается от 61,43 до 10,72 %, а для NaOH 40 % – от 70,57 до 34,71 %. На этом основании следует говорить об экспериментально установленной тенденции фазового распределения; утверждать переход конкретных гидратных фаз при 49 °C без фазового анализа нельзя.

Охлаждение фильтрата вызывает дополнительное выделение осадка. Во всех четырёх опытах с NaOH 35 % количественно оценён вклад второй стадии (табл. 2). Доля вторично выделенной твёрдой фазы в суммарной массе осадка изменяется с 3,85 % при температуре абсорбции 20 °C до 88,35 % при 80 °C. Этот показатель отражает место образования осадка в принятой технологической схеме, но не равен степени превращения NaOH или степени извлечения сероводорода.

В опыте с 35 %-ным NaOH и температурой абсорбции 20 °C получена наибольшая среди четырёх соответствующих опытов доля первичного осадка. В то же время при 80 °C основной вклад в суммарную массу выделенной твёрдой фазы вносит вторичная

кристаллизация при охлаждении. Выбор промышленного режима должен основываться на совокупности критериев: полноте связывания H_2S, составе и качестве продукта, пригодности суспензии к перекачиванию, производительности фильтра, затратах на охлаждение и требованиях безопасности. На основании только отношения Ж:Т установить единственный оптимум нельзя.

Для 35 %-ного NaOH увеличение температуры абсорбции от 20 до 80 °C уменьшает массу первичного осадка с 58,661 до 8,698 г. При 40 %-ном NaOH осадок образуется во всём исследованном интервале; при 80 °C его расчётная массовая доля составляет 34,71 %. Эти наблюдения подтверждают, что исходная концентрация щёлочи существенно изменяет условия работы стадии первичного разделения.

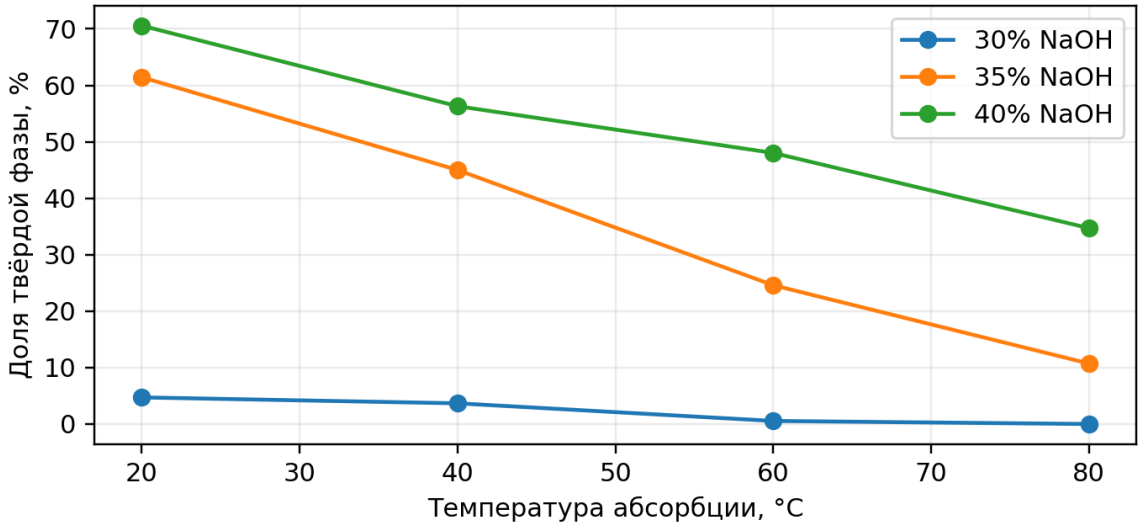


Рисунок 3. Рассчитанная массовая доля первичной твёрдой фазы по данным таблицы 1

Таблица 2. Первичное и вторичное выделение твёрдой фазы при использовании 35 %-ного раствора NaOH

№	Т абсорбции, °C	$m_т$, 1, г	$m_т$, 2, г	$m_т$, Σ, г	Доля второй стадии в $m_т$, Σ, %
1	20	58,661	2,351	61,012	3,85
2	40	40,830	10,092	50,922	19,82
3	60	21,134	30,430	51,564	59,01
4	80	8,698	65,948	74,646	88,35

В таблице 2 представлены массы первичного осадка $m_{т,1}$, дополнительно выделенного при охлаждении осадка $m_{т,2}$ и их сумма $m_{т,Σ}$. При повышении температуры абсорбции с 20 до 80 °C вклад охлаждения в общую массу выделившейся твёрдой фазы увеличивается от 3,85 до 88,35 %. При этом сумма масс осадков различается между отдельными опытами (от 50,922 до 74,646 г), что требует нормирования на исходную загрузку и поглощённый H_2S, прежде чем делать выводы о сравнительном выходе продукта.

Таблица 3. Плотность фильтратов в зависимости от температуры измерения и номера образца

Номер образца в исходной серии опытов	Температура измерения плотности, °C; ρ в г/см³		
	20	40	60
Плотность фильтратов при получении сульфидсодержащего продукта (исходное обозначение: $Na_2S·9H_2O$)			
1	1,235	1,218	1,201
2	1,238	1,223	1,214
3	1,298	1,278	1,257
6	1,238	1,223	1,214
7	1,285	1,301	1,275
11	1,300	1,283	1,252
При получении гидросульфида натрия NaHS			
1	1,212	1,203	1,194
2	1,206	1,200	1,192
3	1,203	1,217	1,203
5	1,229	1,210	1,192
6	1,235	1,227	1,220
7	1,229	1,220	1,208
9	1,246	1,224	1,203
10	1,247	1,239	1,232
11	1,250	1,241	1,230

Таблица 3 содержит значения плотности при 20, 40 и 60 °C для разных образцов растворов, полученных при исследовании сульфидсодержащих систем. В группе образцов, отнесённых в исходных материалах к получению гидратированного сульфида натрия, плотность изменяется от 1,2012 до 1,3016 г/см³. Указанные температурные значения относятся к измерению плотности, а не обязательно к температуре абсорбции. Нумерация образцов не согласуется с четырьмя строками таблицы 2 и требует сверки с лабораторным журналом.

Для отдельных образцов наблюдается снижение плотности при нагревании: например, у образца № 1 – с 1,2352 г/см³ при 20 °C до 1,2012 г/см³ при 60 °C. У образца № 7 изменение немонотонное (1,2856; 1,3016; 1,2756 г/см³). Поэтому по представленным данным нельзя утверждать единообразный рост плотности с температурой абсорбции или делать количественный вывод о концентрации Na_2S без независимого анализа состава раствора.

Заключение

В серии опытов с 30, 35 и 40 %-ными растворами NaOH при 20-80 °C повышение исходной концентрации щёлочи увеличивало долю первичной твёрдой фазы, тогда как повышение температуры абсорбции уменьшало её. Для 35 %-ного NaOH в интервале 20-80 °C доля первичного осадка снижалась с 61,43 до 10,72 %, а отношение Ж:Т возрастало с 0,628 до 8,333. При охлаждении полученного фильтрата вклад вторичного осадка в суммарную массу выделенной твёрдой фазы повышался с 3,85 до 88,35 %. Тем самым установлено перераспределение нагрузки между первичным разделением и последующей

кристаллизацией. Для окончательного выбора рационального режима необходимы данные о фазовом составе твёрдого продукта, химическом балансе серы и натрия, температуре охлаждения, воспроизводимости опытов и эксплуатационных показателях фильтрования.

Список литературы

1. Кемпбел Д.М. Очистка и переработка природных газов / пер. с англ.; под ред. С.Ф. Гудкова. – М.: Недра, 1977. – 349 с.
2. Коуль А.Л., Ризенфельд Ф.С. Очистка газа / пер. с англ.; под ред. И.И. Абрамсона. – 2-е изд. – М.: Недра, 1968. – 394 с.
3. Мазгаров А.М., Вильданов А.Ф., Окружнов М.А. и др. Способ получения сульфида натрия абсорбцией сероводородсодержащего газа раствором гидроксида натрия: пат. RU 2813888 C1, Российская Федерация; заявл. 05.09.2023; опубл. 19.02 [Электронный ресурс]. – 2024. URL: https://patents.google.com/patent/RU2813888C1/ru (дата обращения: 09.11.2026).
4. Bobek J. Rippel-Pethő D., Molnár É., Bocsi R. Selective Hydrogen Sulphide Removal from Acid Gas by Alkali Chemisorption in a Jet Reactor // Hungarian Journal of Industry and Chemistry. – 2016. – T. 44, № 1. – P. 51–54. – DOI: 10.1515/hjic-2016-0006.
5. Dubois L., Thomas D. Comparison of Various Alkaline Solutions for H_2S/CO_2-Selective Absorption Applied to Biogas Purification // Chemical Engineering & Technology. – 2010. – T. 33, № 10. – P. 1601–1609. – DOI: 10.1002/ceat.201000171.
6. Haloho H.M., Nugraha M.G., Hidayat M. Optimization of H_2S absorption in three-series tower using caustic solution // Journal of the Indian Chemical Society. – 2026. – DOI: 10.1016/j.jics.2026.103041.
7. He F., Chen Y., Zhao B., Chen C., Huang S., Peng S. H_2 Reduction of Na_2SO_4 to Na_2S Based on Dilute-Phase Fluidization // Processes. – 2024. – T. 12, № 4. – Art. 776. – DOI: 10.3390/pr12040776.
8. Kohl A.L., Nielsen R. Gas Purification. – 5th ed. – Houston: Gulf Publishing, 1997. – 1395 P.
9. Liu C., Wen S., Wang M., Lin B., Zhou X., Jiang Z. Acid gas treatment process and application for producing sodium hydrosulfide with three-stage reaction coupling system // Petroleum and Natural Gas Chemical Industry. – 2025. – T. 54, № 2. – P. 1–8. – DOI: 10.3969/j.issn.1007–3426.2025.02.001.
10. Molnár É., Rippel-Pethő D., Horváth G., Hodai Z., Bocsi R., Bobek J. Benefits of Jet Reactor Application in Alkaline Gas Purification // Periodica Polytechnica Chemical Engineering. – 2016. – T. 60, № 2. – P. 74–77. – DOI: 10.3311/PPch.8261.
11. Raksajati A., Purwanto H.K., Baskoro A.N., Indarto A., Ariono D. Selective H_2S Absorption Using the Mixture of NaOH-$NaHCO_3$-Na_2CO_3 Buffer Solvent Solution // Journal of Engineering and Technological Sciences. – 2022. – T. 54, № 5. – Art. 220513. – DOI: 10.5614/j.eng.technol.sci.2022.54.5.13.

12. Sobrinho R.A. L., Souza W. de J., Souza D.F. de S. et al. Mathematical Modeling of Acidity Removal from Natural Gas through Alkaline Scrubbing // ACS Omega. – 2025. – T. 10, № 35. – P. 40625–40634. – DOI: 10.1021/acsomega.5c07091.
13. U.S. Geological Survey. Sulfur Statistics and Information [Электронный ресурс]. URL: https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/sulfur-statistics-and-information (дата обращения: 09.11.2026).

References

1. Kempbel D.M. [Natural Gas Purification and Processing]. Moscow: Nedra, 1977. 349 P. (In Russ.).
2. Koul A.L., Rizenfel’d F.S. [Gas Purification]. 2nd ed. Moscow: Nedra, 1968. 394 P. (In Russ.).
3. Mazgarov A.M., Vil’danov A.F., Okruzhnov M.A. et al. [Method for Producing Sodium Sulfide by Absorption of Hydrogen Sulfide-Containing Gas with Sodium Hydroxide Solution]. Russian patent RU 2813888 C1, published 19.02.2024. [Электронный ресурс]. – URL: https://patents.google.com/patent/RU2813888C1/ru (accessed: 09.11.2026). (In Russ.).
4. Bobek J., Rippel-Pethő D., Molnár É., Bocsi R. Selective Hydrogen Sulphide Removal from Acid Gas by Alkali Chemisorption in a Jet Reactor. Hungarian Journal of Industry and Chemistry, 2016, vol. 44, no. 1, P. 51–54. DOI: 10.1515/hjic-2016-0006.
5. Dubois L., Thomas D. Comparison of Various Alkaline Solutions for H_2S/CO_2-Selective Absorption Applied to Biogas Purification. Chemical Engineering & Technology, 2010, vol. 33, no. 10, P. 1601–1609. DOI: 10.1002/ceat.201000171.
6. Haloho H.M., Nugraha M.G., Hidayat M. Optimization of H_2S absorption in three-series tower using caustic solution // Journal of the Indian Chemical Society. – 2026. – DOI: 10.1016/j.jics.2026.103041.
7. He F., Chen Y., Zhao B., Chen C., Huang S., Peng S. H_2 Reduction of Na_2SO_4 to Na_2S Based on Dilute-Phase Fluidization. Processes, 2024, vol. 12, no. 4, article 776. DOI: 10.3390/pr12040776.
8. Kohl A.L., Nielsen R. Gas Purification. 5th ed. – Houston: Gulf Publishing, 1997. – 1395 P.
9. Liu C., Wen S., Wang M., Lin B., Zhou X., Jiang Z. Acid gas treatment process and application for producing sodium hydrosulfide with three-stage reaction coupling system. Petroleum and Natural Gas Chemical Industry, 2025, vol. 54, no. 2, P. 1–8. DOI: 10.3969/j.issn.1007–3426.2025.02.001.
10. Molnár É., Rippel-Pethő D., Horváth G., Hodai Z., Bocsi R., Bobek J. Benefits of Jet Reactor Application in Alkaline Gas Purification. Periodica Polytechnica Chemical Engineering, 2016, vol. 60, no. 2, P. 74–77. DOI: 10.3311/PPch.8261.
11. Raksajati A., Purwanto H.K., Baskoro A.N., Indarto A., Ariono D. Selective H_2S Absorption Using the Mixture of NaOH-$NaHCO_3$-Na_2CO_3 Buffer Solvent Solution // Journal of Engineering and Technological Sciences. – 2022. – No. 5. – Art. 220513. – DOI: 10.5614/j.eng.technol.sci.2022.54.5.13.

12. Sobrinho R.A. L., Souza W. de J., Souza D.F. de S. et al. Mathematical Modeling of Acidity Removal from Natural Gas through Alkaline Scrubbing. ACS Omega, 2025, vol. 10, no. 35, P. 40625-40634. DOI: 10.1021/acsomega.5c07091.
13. U.S. Geological Survey. Sulfur Statistics and Information. Available at: [Электронный ресурс]. – URL: https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/sulfur-statistics-and-information (accessed: 09.11.2026).

Статья поступила в редакцию: 19.09.2026
Статья принята к публикации: 27.09.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 66.074.3:628.511.24

Очистка дымовых газов кирпичных производственных предприятий от вредных примесей с помощью абсорберной установки

Фазлитдинов Жахонгир Равшанович
магистрант
Бухарский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Бухара

Шарипов Нодиржон Замирович
PhD, доц.
кафедра Технологические машины и оборудование, Бухарский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Бухара
E-mail: nodirzhons@bk.ru

Нарзиев Мирзо Саидович
д-р техн. наук, проф.
DSc, кафедра Технологические машины и оборудование, Бухарский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Бухара
E-mail: nodirzhons@bk.ru

Purification of flue gases from brick-manufacturing enterprises using an absorption unit

Fazlitdinov Jakhongir Ravshanovich
Master's degree student, Bukhara State Technical University
Uzbekistan, Bukhara

Sharipov Nodirjon Zamirovich
Associate Professor, PhD
Department of Technological Machines and Equipment, Bukhara State Technical University
Uzbekistan, Bukhara

Narziyev Mirzo Saidovich
professor, Doctor of Technical Sciences (DSc)
Department of Technological Machines and Equipment, Bukhara State Technical University
Uzbekistan, Bukhara

Библиографическое описание: Фазлитдинов Ж.Р., Шарипов Н.З., Нарзиев М.С. Очистка дымовых газов кирпичных производственных предприятий от вредных примесей с помощью абсорберной установки // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23560

Аннотация

Целью работы является разработка технологической схемы и обоснование конструктивных параметров абсорбционной установки для эффективной очистки дымовых газов кирпичных заводов, работающих на твёрдом угольном топливе, на основе натурных измерений их фактического состава. Для достижения этой цели решались задачи оценки фактического состава дымовых газов, расчёта интегрального показателя загрязнения атмосферы и обоснования геометрических параметров абсорбционного аппарата. Параметры аппарата обоснованы натурными измерениями на заводе ООО «Бухоро ғишт» (Бухарская область), сжигающем уголь Шаргуньского месторождения. Пробы отбирались по ГОСТ 17.2.4.06 – 90; SO_2 определялся йодометрическим титрованием, NO_2 — фотоколориметрией с реактивом Зальцмана, CO — ИК-спектрометрией, пыль — гравиметрически. Установлено, что среднесуточные концентрации SO_2 (985 мг/м³), NO_2 (495 мг/м³), CO (1850 мг/м³) и пыли (315 мг/м³) стабильно превышают ПДК в 1,7–2,9 раза; интегральный показатель КИЗ = 8,4 характеризует ситуацию как чрезвычайную. Предложена технологическая схема форсуночного абсорбера с тангенциальным вводом газа и замкнутой рециркуляцией щелочного раствора (NaOH, Na_2CO_3); определены её геометрические параметры — площадь сечения 0,38 м², расход газа около 5470 м³/ч, диаметр корпуса около 1,4 м. Расчётная эффективность улавливания загрязняющих веществ обеспечивает снижение их концентраций до уровня, не превышающего установленные ПДК. Обоснована целесообразность утилизации насыщенного поглотителя для получения минеральных удобрений, что придаёт предложенной технологии замкнутый эколого-экономический характер. Практическая ценность работы — достижение нормативных показателей экологической безопасности при минимальных затратах на газоочистку.

Abstract

The study addresses the development of an absorption unit for deep cleaning of flue gases from coal-fired brick plants. The aim of the work is to develop a technological scheme and substantiate the design parameters of the absorption unit for effective flue gas purification based on field measurements of the gas composition; the tasks include assessing the actual flue gas composition, calculating an integral pollution index, and justifying the absorber’s geometric parameters. Equipment parameters were substantiated by field measurements at the «Bukhoro g'isht» plant (Bukhara region), which burns Shargun deposit coal. Sampling followed GOST 17.2.4.06 – 90; SO2 was determined by iodometric titration, NO_2 by Saltzman photocolorimetry, CO by infrared spectrometry, and dust gravimetrically. Mean concentrations of SO_2 (985 mg/m³), NO_2 (495 mg/m³), CO (1850 mg/m³) and dust (315 mg/m³) were found to exceed maximum permissible levels by 1.7–2.9 times; the complex pollution index (CPI = 8.4) indicates an emergency ecological state. A spray-tower absorber with a tangential gas inlet and alkaline recirculation (NaOH/Na_2CO_3) is proposed, with design parameters defined: cross-section 0.38 m², gas throughput about 5470 m³/h, column diameter about 1.4 m. Reuse of the saturated absorbent for mineral fertiliser production is justified. The practical value lies in achieving regulatory compliance with minimal capital cost.

Ключевые слова: дымовые газы, абсорбер, абсорбция, диоксид серы, оксид азота, оксид углерода, предельно допустимая концентрация.

Keywords: flue gases, absorber, absorption, sulphur dioxide, nitrogen oxide, carbon monoxide, maximum permissible concentration.

Введение

Промышленность строительных материалов формирует около 34,7 % газовых выбросов страны [7]. Неполное сгорание угольного топлива в обжиговых печах образует смесь свыше 200 токсичных соединений, включая канцероген бенз(а)пирен, что способствует смогу и деградации качества воздуха [7]. Кирпичные заводы с туннельными печами выбрасывают 150 000–200 000 м³ дымовых газов в сутки [3]. Указом Президента Республики Узбекистан от 30.01.2025 г. № ПФ-16 определены меры по сокращению вредных выбросов [9], Постановлением Кабинета Министров от 04.09.2018 г. № 707 утверждены ПДК загрязняющих веществ [8].

Вопросам очистки дымовых газов посвящены заявка WO 2025/063859 A1 [4] и патент RU 2807935 [5], работы Ф.Т. Маматалиевой по экологии кирпичного производства [7] и С.Г. Алмухаметовой с А.Н. Бусыгиным по выбору абсорбционного оборудования [2]. Из новейших исследований по хемосорбции: А. Акурпекова с соавторами [1] и Л.А. Кормина с Д.С. Зайцевой [6] показали эффективность очистки растворами метилдиэтаноламина, а F. Di Natale с соавторами — рост улавливания SO_2 с 87 до 97 % при электрически заряженном орошении [10]. Конструктивные параметры абсорберов для кирпичных заводов на местном угле изучены недостаточно, что определило цель работы — разработку технологической схемы и обоснование параметров абсорбционной установки на основе натурных измерений; задачи: оценить состав дымовых газов, сопоставить его с ПДК через комплексный индекс загрязнения, рассчитать параметры абсорбера и оценить утилизацию насыщенного хемосорбента.

Материалы и методы

Объект исследования — завод ООО «Бухоро ғишт» (Каракульский район, Бухарская область) мощностью 15 млн шт. условного кирпича в год с туннельной печью на угле Шаргуньского месторождения (5200–5500 ккал/кг, зольность 15–18 %, сера 0,8–1,2 %). Пробы отбирались из устья дымовой трубы по ГОСТ 17.2.4.06 – 90, с охватом разных смен и сезонов 2026 года (не менее 10 измерений за сезон).

Внедрённый аналитический комплекс включал следующие сертифицированные методики:

– определение мгновенного содержания SO_2 — посредством классического йодометрического титрования (абсолютная погрешность не превышала ±2,5 %);

– контроль концентрации NO_2 — фотоколориметрическим способом с применением специфического реактива Зальцмана (погрешность в пределах ±3,0 %);

– регистрация уровня CO — методом автоматической инфракрасной спектрометрии на базе поверенного газоанализатора «ОПТОГАЗ-500» (погрешность прибора ±2,0 %);

– оценка запылённости — посредством стандартного гравиметрического метода с осаждением дисперсной фазы на аналитические фильтры (точность ±1,5 %).

Анализы выполнены в аккредитованной лаборатории. Анемометром зафиксирована скорость потока v = 4 м/с при диаметре устья d = 700 мм; площадь живого сечения газохода:

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \approx 0,38 \text{ м}^2$$

Объёмный расход эвакуируемых газов при рабочих условиях составил:

$$Q = v \cdot S \approx 5470 \text{ м}^3/\text{ч}$$

Диаметральный габарит корпуса абсорбера рассчитывался исходя из условия обеспечения оптимальной среднеинтегральной скорости газа в свободном сечении колонны (w = 1,0 м/с) для предотвращения капельного уноса:

$$D = \sqrt{\frac{4Q}{\pi \cdot w}} \approx 1,4 \text{ м}$$

что послужило отправной точкой для технологического проектирования.

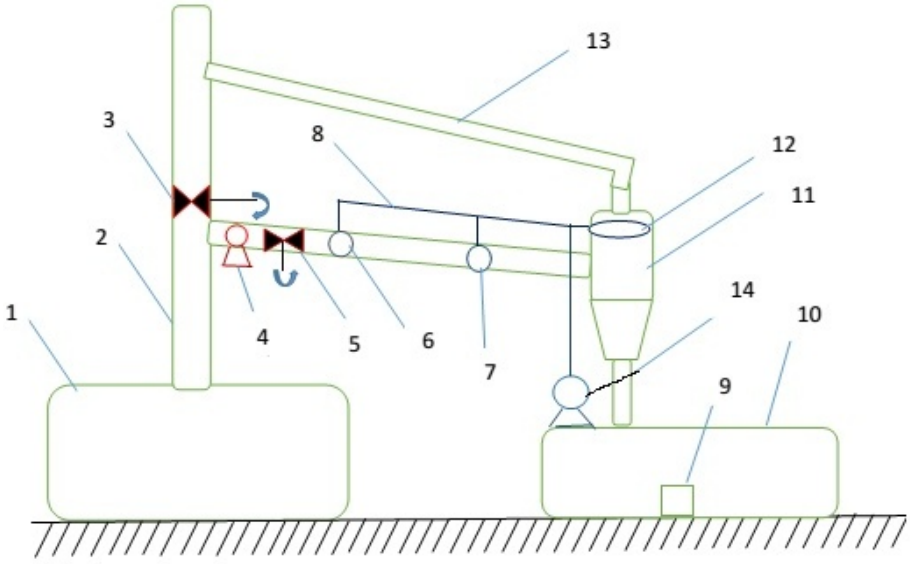


Рисунок 1. Технологическая схема очистки дымовых газов кирпичного производственного предприятия: 1 — печь; 2 — труба; 3, 5 — вентили; 4 — газодувка; 6, 7, 12 — форсунки; 8 — трубопровод абсорбента; 9 — перегородка; 10 — ёмкость абсорбента; 11 — абсорбер; 13 — труба отвода газа; 14 — насос

Результаты и обсуждение

Сводные результаты многофакторного химико-экологического мониторинга состава отходящих дымовых газов исследуемого завода систематизированы в таблице 1.

Таблица 1. Химический состав дымовых газов кирпичного завода (2026 г.)

Компонент	Диапазон, мг/м³	Среднее, мг/м³	ПДК, мг/м³	Превышение, раз
SO_2	850–1200	985 ± 98	500	1,7–2,4
NO_2	420–580	495 ± 45	200	2,1–2,9
CO	1500–2200	1850 ± 120	1000	1,5–2,2
Пыль	250–380	315 ± 30	150	1,7–2,5

Наиболее стабильное превышение ПДК наблюдается по диоксиду азота (до 2,9 раза); зимой концентрации SO_2 и CO на 20–25 % выше летних из-за роста расхода угля. При среднесуточном объёме дымоудаления ~175 000 м³ предприятие рассеивает около 232,8 т загрязняющих веществ в год (SO_2 — 62,9 т; NO_2 — 31,6 т; CO — 118,2 т; пыль — 20,1 т).

Комплексный индекс загрязнения:

$$\text{КИЗ} = \Sigma(C_i/\text{ПДК}_i) = 1,97 + 2,48 + 1,85 + 2,10 = 8,4$$

что относит зону к категории чрезвычайной экологической ситуации

(КИЗ>5); большинство компонентов принадлежат ко 2–3-му классам опасности.

Предложенная схема (рис. 1) отличается простотой и доступным хемосорбентом — оборотным 3–5 % раствором NaOH и Na_2CO_3. Тангенциальный ввод газа и орошение форсункой 12 развивают межфазную поверхность и интенсифицируют массопередачу, что согласуется с данными [10] (рост улавливания SO_2 до 97 %). Поглощение кислых компонентов протекает по реакциям

$$SO_2 + 2NaOH \rightarrow Na_2SO_3 + H_2O$$

с последующим окислением Na_2SO_3 до Na_2SO_4, а также NO_2 и частично

$$CO_2 + Na_2SO_3 \rightarrow NaHCO_3 + NaNO_3$$

При плотности орошения не ниже 8–10 м³/(м²·ч) ожидаемая степень улавливания SO_2 и пыли составляет 90–95 %, что обеспечивает снижение остаточных концентраций ниже уровня ПДК. Перегородка 9 и ёмкость 10 обеспечивают многократную циркуляцию раствора насосом 14, что минимизирует расход свежего реагента и делает эксплуатацию установки экономически оправданной для предприятий малой и средней мощности. Периодическая корректировка щёлочности раствора (добавление NaOH при снижении pH ниже 8) позволяет поддерживать стабильную эффективность очистки на протяжении всего межрегенерационного цикла. Насыщенный раствор, обогащённый сульфитами, сульфатами и карбонатами натрия, перспективен для переработки в минеральные удобрения (сульфат натрия, кальциевая селитра) — направление, требующее отдельного технико-экономического обоснования. По сравнению с сухими методами газоочистки (электрофильтры, рукавные фильтры) предложенная абсорбционная схема одновременно улавливает твёрдую и газообразную составляющие выбросов, что делает её предпочтительной для кирпичных заводов с ограниченными инвестиционными возможностями.

Заключение

1. Зафиксировано превышение нормативов воздуха по SO_2, NO_2, CO и пыли (в 1,7–2,9 раза); КИЗ = 8,4 характеризует район как зону чрезвычайной экологической ситуации, годовой выброс токсикантов — 232,8 т.

2. Разработана схема форсуночного абсорбера с тангенциальным вводом газа и рециркуляцией щелочного раствора; рассчитаны основные параметры (S = 0,38 м², Q ≈ 5470 м³/ч, D ≈ 1,4 м).

3. Предприятию рекомендуется внедрить абсорбционный узел, организовать непрерывный контроль состава уходящих газов и переработку насыщенного хемосорбента в минеральные удобрения, что придаёт технологии замкнутый эколого-экономический характер.

Список литературы

1. Акурпекова, А. Исследование водных растворов метилдиэтаноламина, применяемых для очистки газов / А. Акурпекова, А.Н. Нефедов, Ө. Дәлелханұлы [и др.] // Известия НАН РК. Серия химии и технологии. – 2021. – № 5–6. – С. 6–13.
2. Алмухаметова, С.Г. Очистка воздуха от загрязняющих веществ в производстве / С.Г. Алмухаметова, А.Н. Бусыгин // Экология и промышленность. – 2022. – № 5. – С. 34–38.
3. ГОСТ 17.2.4.06–90. Охрана природы. Атмосфера. Методы определения запылённости и загазованности. – Москва: Изд-во стандартов, 1990. – 15 с.
4. Заявка WO 2025/063859 A1. Установка для очистки дымовых газов / А.Д. Абаев, А.А. Келойти, М.О. Марзаев, Б.А. Керимов. – Опубл. 27.03.2025.
5. А.И. Иванов, В.П. Петров. Патент RU 2807935. Способ очистки дымовых газов от диоксида углерода в теплоэнергетике. – 2023.
6. Кормина, Л.А. Абсорбционная очистка газов производственных котельных / Л.А. Кормина, Д.С. Зайцева // Ползуновский вестник. – 2022. – № 2. – С. 117–121. – DOI: 10.25712/ASTU.2072–8921.2022.02.016.
7. Маматалиева, Ф.Т. Экологические проблемы кирпичного производства и пути их решения / Ф.Т. Маматалиева // Наука и новые технологии. – 2021. – № 3. – С. 112–115.
8. Постановление Кабинета Министров Республики Узбекистан от 04.09.2018 № 707 «О совершенствовании нормативно-правовых документов в сфере охраны атмосферного воздуха».
9. Указ Президента Республики Узбекистан от 30.01.2025 № ПФ-16 «О мерах по охране атмосферного воздуха и сокращению вредных выбросов промышленных предприятий» [Электронный ресурс]. URL: https://lex.uz/ru/docs/7369703 (дата обращения: 18.09.2026).
10. Di Natale, F. Wet electrostatic scrubbing for flue gas treatment / F. Di Natale, C. Carotenuto, A. Parisi, D. Flagiello, A. Lancia // Fuel. – 2022. – T. 325. – DOI: 10.1016/j.fuel.2022.124888.

References

1. Akurpekova A., Nefedov A.N. Dəlelkhanұly Ө. i dr. [Investigation of Aqueous Solutions of Methyldiethanolamine Used for Gas Purification] // Izvestiya NAN RK. Seriya khimii i tekhnologii. – 2021. – No. 5–6. (In Russ.).
2. Almukhametova S.G., Busygin A.N. [Air Purification from Pollutants in Industrial Production] // Ekologiya i promyshlennost'. – 2022. – No. 5. (In Russ.).
3. GOST 17.2.4.06–90. [Environmental Protection. Atmosphere. Methods for Determining Dust Content and Gas Contamination]. – M.: Izd-vo standartov, 1990. – 15 s (In Russ.).
4. Zayavka WO 2025/063859 A1. [Installation for Flue Gas Purification] / Abaev A.D., Kelojti A.A., Marzaev M.O., Kerimov B.A. – Opubl. 27.03.2025 (In Russ.).
5. Ivanov A.I., Petrov V.P. [Patent RU 2807935. Method for Purification of Flue Gas from Carbon Dioxide in Thermal Power Engineering] / Ivanov A.I., Petrov V.P. – 2023. (In Russ.).
6. Kormina L.A., Zajtseva D.S. [Absorption Purification of Gases in Industrial Boiler Houses] // Polzunovskij vestnik. – 2022. – No. 2. – DOI: 10.25712/ASTU.2072–8921.2022.02.016. (In Russ.).
7. Mamatalieva F.T. [Environmental Problems of Brick Production and Solutions to Them] // Nauka i novye tekhnologii. – 2021. – No. 3. (In Russ.).
8. [Resolution of the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan dated 04.09.2018 No. 707 'On Improvement of Regulatory Legal Documents in the Field of Atmospheric Air Protection'] (In Russ.).
9. [Decree of the President of the Republic of Uzbekistan dated 30.01.2025 No. PF-16 'On Measures for Atmospheric Air Protection and Reduction of Harmful Emissions from Industrial Enterprises'] [Электронный ресурс]. – URL: https://lex.uz/ru/docs/7369703 (accessed: 18.09.2026). (In Russ.).
10. Di Natale F., Carotenuto C., Parisi A., Flagiello D., Lancia A. Wet electrostatic scrubbing for flue gas treatment // Fuel. – 2022. – Vol. 325. – Art. 124888. – DOI: 10.1016/j.fuel.2022.124888.

Статья поступила в редакцию: 11.10.2026
Статья принята к публикации: 29.10.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 678.07.03

Влияние микрокальцита на структуру и кинетику водопоглощения композиции фрикционного назначения

Хайдаров Ильхом Юсупович
соискатель
Государственного учреждения «Фан ва тараккиёт» Ташкентский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: bozorboyev1983@mail.ru
Юлдашов Диканбай Янгибаевич
канд. техн. наук, доц.
завидущий лабораторий Государственного учреждения «Фан ва тараккиёт» Ташкентский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Рахимов Хуршид Юлдашович
д-р философии по техн.наук (PhD)
ГУП «Фан ва тараққиёт», Ташкентский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Нормуродов Анвар Азамат Ўғли
соискатель
Государственного учреждения «Фан ва тараккиёт» Ташкентский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент

The influence of microcalcite on the structure and water absorption kinetics of a friction composite

Khaidarov Ilkhom Yusupovich
doctor of Science State Institution «Fan va Tarakkiyot» Tashkent State Technical University
Republic of Uzbekistan, Tashkent
Yuldashov Dikanbay Yangibaevich
PhD in Engineering
Assoc. Professor Head of Laboratories, State Institution «Fan va Tarakkiyot» Tashkent State Technical University
Republic of Uzbekistan, Tashkent
Rakhimov Khurshid Yuldashovich
doctor of Philosophy in Engineering Sciences (PhD)
State Unitary Enterprise «Fan va Tarakkiyot» Tashkent State Technical University
Republic of Uzbekistan, Tashkent
Normurodov Amar Azamat Ogli
doctor of Science State Institution «Fan va Tarakkiyot» Tashkent State Technical University
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Библиографическое описание: Влияние микрокальцита на структуру и кинетику водопоглощения композиции фрикционного назначения // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Хайдаров И.Ю. [и др.]. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23655

Аннотация

Целью настоящего исследования является изучение влияния микрокальцита на структурные особенности и кинетику водопоглощения композиционных полимерных материалов фрикционного назначения. Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения термостойкости, водостойкости и эксплуатационной надёжности фрикционных композиций, применяемых в тормозных механизмах транспортных средств и промышленного оборудования. В качестве минерального наполнителя исследован микрокальцит, представляющий собой высокодисперсный карбонат кальция. В работе рассмотрены физико-химические характеристики наполнителя, особенности его распределения в полимерной матрице и взаимодействия со связующим. Для изучения морфологии композиционных материалов использован метод оптической микроскопии. Проведено сравнительное исследование водопоглощения модельных композиций, содержащих микрокальцит, базальт и асбест, а также рассмотрено влияние природы полимерного связующего на сорбцию влаги. Приведены физико-химические и другие свойства изучемого объекта, микрокальцита и исходных компонентов. По результатам исследования установлено, что введение микрокальцита способствует повышению водостойкости композиционных материалов и уменьшению количества поглощаемой влаги. Выявленная закономерность связывается с особенностями структуры наполненной полимерной матрицы и распределения минеральных частиц в связующем. Полученные результаты могут быть использованы при разработке и совершенствовании износостойких полимерных композиционных материалов фрикционного назначения.

Abstract

The aim of this study is to investigate the influence of microcalcite on the structural characteristics and water absorption kinetics of polymer composite materials intended for friction applications. The relevance of the research is determined by the need to improve the water resistance and operational reliability of friction composites used in vehicle braking systems and industrial equipment. Microcalcite, a highly dispersed form of calcium carbonate, was investigated as a mineral filler. The physicochemical properties of the filler, its distribution within the polymer matrix, and its interaction with the binder were considered. Optical microscopy was used to examine the morphology of the composite materials. A comparative assessment of water absorption was performed for model composites containing microcalcite, basalt, and asbestos. The influence of the polymer binder type on moisture sorption was also considered. The results indicate that the incorporation of microcalcite improves the water resistance of the composite materials and reduces the amount of absorbed moisture. This effect is associated with the structural characteristics of the filled polymer matrix and the distribution of mineral particles within the binder. The findings may be useful in the development and improvement of wear-resistant polymer composite materials for friction applications.

Ключевые слова: композиционные полимерные материалы, микрокальцит, карбонат кальция, фрикционные материалы, микроструктура, водопоглощение, водостойкость.

Keywords: polymer composites, microcalcite, calcium carbonate, friction materials, microstructure, water absorption, water resistance.

Введение

В современном мире вся движущаяся транспортная среда и техника снабжена тормозными механизмами, которые в своё время должны без труда остановить механизм или технику. В этом плане в тормозных механизмах применяются композиционные полимерные фрикционные материалы. Как было отмечено в предыдущих сообщениях, композиционные полимерные материалы представляют собой многокомпонентные системы [2, 5], где общее число ингредиентов в рецептуре достигает 10 и более. В общем виде используемые ингредиенты и связующие можно разделить на три основные группы: теплостойкий армирующий компонент — асбестовое, углеродное и стекловолокно; фрикционно-способный порошкообразный и другие наполнители неорганического и органического происхождения; полимерные связующие — синтетические смолы, каучуки с вулканизующими агентами.

Как известно из практики, наиболее высокий коэффициент трения получается при наполнителях из железного сурика или барита. Увеличение процентного содержания наполнителя за счёт уменьшения связующего приводит к увеличению коэффициента трения. Введение в состав триботехнических материалов фрикционного назначения компонентов (асбеста, шлаковой ваты и т.п.), имеющих низкий коэффициент теплопроводности, противодействует интенсивному проникновению тепла внутрь материала и его прогреванию. Тем самым предохраняются глубинные слои от механохимических явлений и структурных изменений, однако это приводит к возникновению высоких температурных градиентов и высоким значениям температуры на поверхности трения.

Из вышеприведённого следует отметить, что свойства композиционных полимерных материалов во многом определяются природой, формой и размерами частиц наполнителя. Следовательно, путём подбора соответствующих органоминеральных наполнителей становится возможным направленно регулировать не только физико-механические, но и фрикционные свойства композиционных материалов.

Целью настоящей работы является установление влияния микрокальцита на структуру (морфологию, характер распределения частиц наполнителя в полимерной матрице) и кинетику водопоглощения композиционных полимерных материалов фрикционного назначения, а также сравнительная оценка водостойкости композиций с микрокальцитом, базальтом и асбестом и влияния природы полимерного связующего (каучукового и мочевиноформальдегидного) на сорбцию влаги.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. охарактеризовать физико-химические свойства микрокальцита и его распределение в полимерной матрице методом оптической микроскопии;

2. исследовать кинетику водопоглощения модельных композиций с микрокальцитом, базальтом и асбестом (по 20 мас. ч.);

3. оценить влияние типа связующего на водопоглощение композиций с микрокальцитом;

4. сопоставить данные микроскопии с результатами сорбционных испытаний.

Объекты и методы исследования

В наших исследованиях для разработки эффективных износостойких композиционных полимерных материалов фрикционного назначения в качестве приемлемых компонентов использовались связующие — мочевиноформальдегидная смола, бутадиен-метилстирольный каучук (СКМС-30, АРКМ-15) [4, 3]. В качестве дисперсных наполнителей были взяты: барит и микрокальцит, каолин Ангренского месторождения, графит, технический углерод ДГ 100; в качестве структурообразующей системы — окись цинка, альтакс, сера [6, 10].

Далее рассмотрим микронезированный карбонат кальция – $CaCO_3$, так называемый микрокальцид**.** Микрокальцид – это высокодисперсный природный карбонат кальция, измельченный до размеров от 0,5 до 20 микрон. Применяется в качестве активного минерального наполнителя в полимерах, резинах, красках и других композиционных материалах, его молекулярная масса 100,09 г/моль, белый мелкодисперсный порошок, получают путем механического измельчения мрамора.

В таблице 1. приведены физико-химические свойства микрокальцида

Таблица 1. Физико-химические свойства микрокальцида

Свойство	Значение
Цвет	Белый
Плотность	2,7 г/см³
Твердость по Моосу	3
Температура разложения	~825 °C (разложение с выделением CO_2)
Растворимость	Слабо растворим в воде, хорошо в кислотах
Форма частиц	Шаровидная или неправильная

Размер частиц микрокальцида находится в пределах 1 – 5 мкм, имеет низкую пористость, содержание $CaCO_3$ в пределах 98 %, а удельная поверхность находится от 5 до 15 $м^2/г$.

Методика испытаний на водопоглощение. Образцы модельных композиций изготавливали методом горячего прессования при температуре 160 ± 5 °C и давлении 10 МПа с последующей выдержкой в термостате. Содержание наполнителей (микрокальцит, базальт, асбест) во всех композициях составляло 20 мас. ч. на 100 мас. ч. связующего. Образцы в виде пластин размером 20 × 20 × 2 мм высушивали до постоянной массы при 60 °C, взвешивали на аналитических весах с точностью до 0,0001 г и погружали в дистиллированную воду при температуре 20 ± 2 °C. Взвешивание проводили через 1, 3, 5, 10, 15, 20 и 25 ч выдержки; перед взвешиванием образцы промокали фильтровальной бумагой. Водопоглощение Δm, %, рассчитывали по формуле $\Delta m = (m\tau - m_0)/m_0 \cdot 100$, где m_0 и $m\tau$ — масса образца до и после выдержки в воде соответственно. Для каждой точки испытывали не менее трёх образцов, результаты усредняли; расхождение параллельных определений не превышало 5 %. Тип связующего варьировали: каучуковое (СКМС-30/АРКМ-15) и мочевиноформальдегидная смола.

Методика оптической микроскопии. Микроскопические исследования различных фрагментов образцов полимерной композиции проводили под оптическим микроскопом с фотографированием участков шлифа и антишлифа при увеличении ×160 (объектив 5×) и ×500 (объектив 20×).

Обсуждение результатов исследования

Необходимо также отметить, что микрокальцид является экологически чистым минеральным наполнителем, с низкой стоимостью, отличающийся совместимостью с различными полимерными материалами. При введении микрокальцида в состав полимеров улучшается их твёрдость, модуль упругости, отличается стабильностью цвета, то есть не желтеет при эксплуатации.

Микрокальцид широко применяется в производстве пластмасс, резинотехнической, бумажной, лакокрасочной и керамической промышленности, позволяющих увеличение твердости, снижению усадки и внутренних напряжений и удешевляющую стоимость полимерной композиции, улучшающей прочности, снижающее стоимости резиновых композиций.

Одними из важных свойств разрабатываемых фрикцонных композиционных полимерных материалов определяющих возможность их использования в качестве фрикционных материалов, являются структура и водопоглащающе характеристики. Так, как многокомпонентная фрикционно- полимерная композиция с несколькими компонентами с различными содержаниями влаги, существенно влияет на структурообразование и свойства получаемого материала.

В микроскопических срезах образцов обнаруживаются ориентированные распределения вытянутых включений наполнителя размером l = 1–1,3 мм, S = 0,001 мм, различаемых по контрасту на фоне связующего. Под оптическим микроскопом также подтверждается общая линейность обломков. Структурно-текстурные особенности, морфология крупных обломков в составе основной массы запечатлены на снимках с увеличением ×160 при объективе 5× и ×500 при объективе 20×, которые приведены на рис. 1.

Структурные особенности композиций по данным оптической микроскопии. На снимках шлифов (рис. 1, а–г) видно, что частицы микрокальцита распределены в матрице достаточно равномерно, без выраженных зон агломерации; крупные включения (агрегаты размером 0,12–0,6 мм) окружены со всех сторон полимерным связующим, что свидетельствует об удовлетворительном смачивании наполнителя связующим и отсутствии пор на границе раздела фаз. Кристаллическая огранка частиц $CaCO_3$ отчётливо проявляется при увеличении ×500 (рис. 1, б, в). Такая морфология — изометричные частицы, равномерно распределённые в непрерывной матрице, — обеспечивает минимизацию свободного объёма и путей диффузии влаги, что и объясняет наблюдаемое снижение водопоглощения (рис. 2, 3). Для асбестосодержащих композиций, напротив, характерна волокнистая текстура с ориентированными вытянутыми включениями, способствующая капиллярному переносу влаги.

Исследование морфологии обломков полимерной композиции показывает присутствие микрокальцита с размерами 0,2 × 0,6 мм, крупные 0,2 × 0,4 мм; 0,12 × 0,12 мм — дисперсные наполнители, а также чёрный фон — наличие связующих, преимущественно состоящих из каучука. Полученные данные исследований различных фрагментов полимерных композиций в виде срезов довольно чётко показывают кристаллическую структуру, присущую микрокальциту, обложенную со всех сторон полимерным связующим. Эти структурные изменения в морфологии более чётко проявляются при кратности увеличения в 500 раз.

Показано, что введение микрокальцита в состав модельного композиционного полимерного материала заметно повышает их водостойкость (рис. 2). Исследования кинетики водопоглощения исследуемых композиций свидетельствуют об уменьшении количества сорбированной влаги пропорционально количеству введённого микрокальцита (рис. 2).

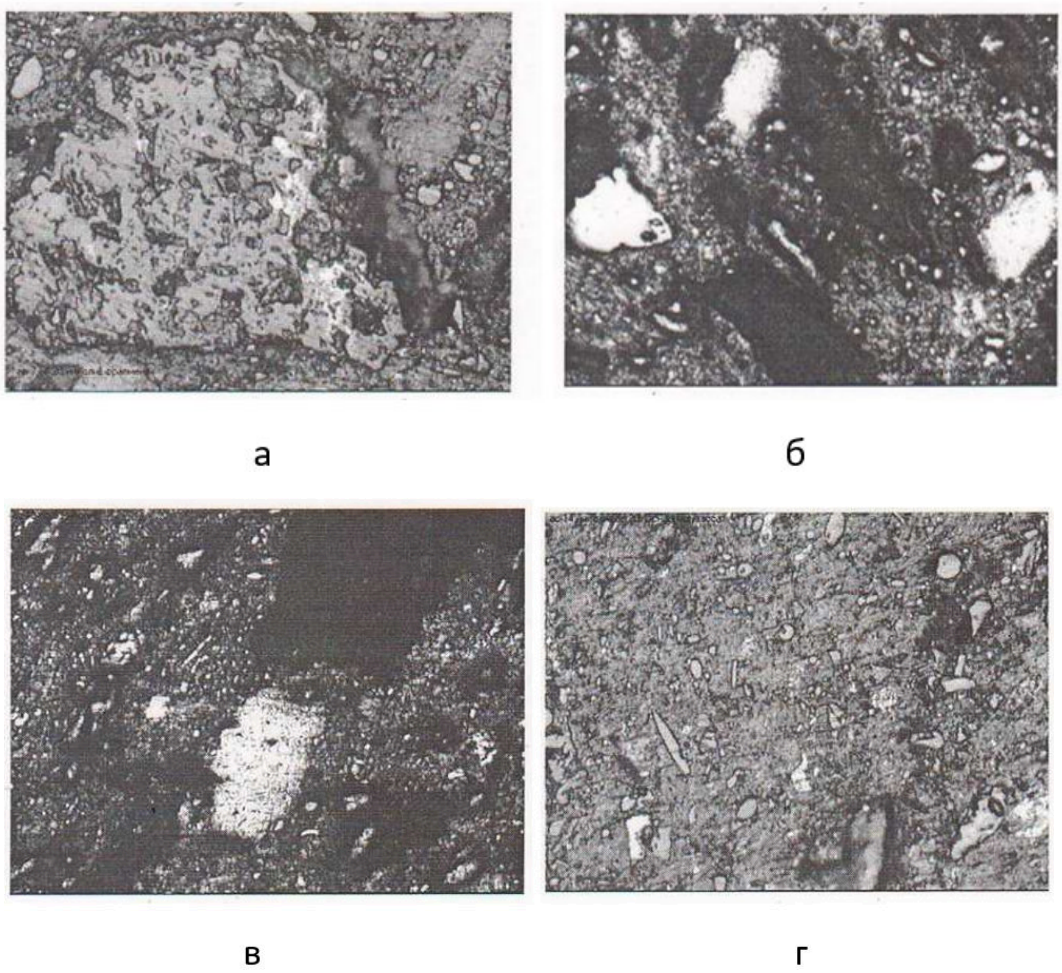


Рисунок 1. Микроснимки срезов различных фрагментов композиционных полимерных материалов: а — общий вид шлифа, ×160; б — крупный обломок микрокальцита, окружённый связующим, ×500; в — распределение дисперсных частиц наполнителя, ×500; г — текстура основной массы, ×160

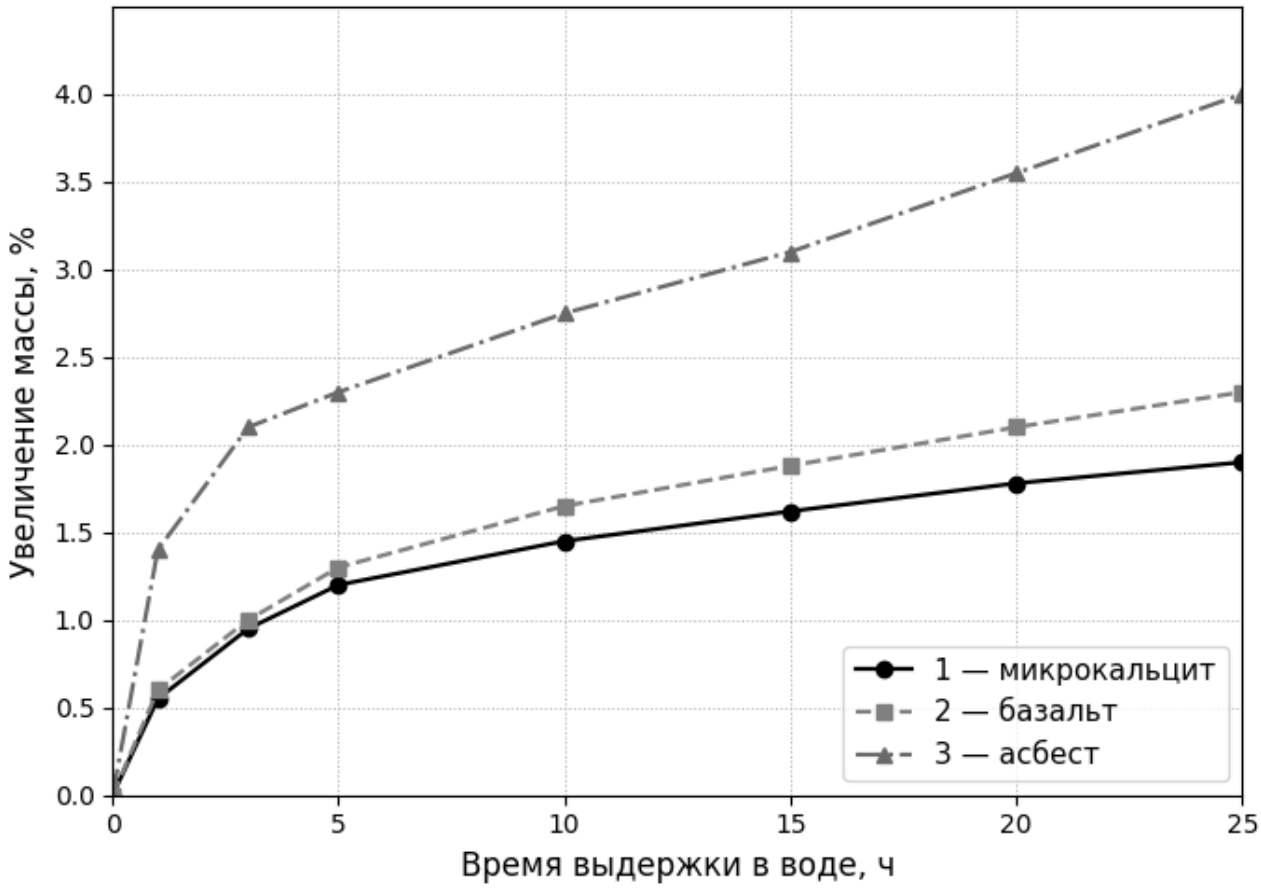


Рисунок 2. Зависимость водопоглощения модельного композиционного полимерного материала с использованием микрокальцида (1), базальта (2) и асбеста (3) по 20 мас.ч. от времени выдержки в воде

Как видно из рис. 2, за 25 ч выдержки в воде водопоглощение композиции с микрокальцитом (кривая 1) составляет ≈1,9 % и практически совпадает с таковым для композиции с базальтом (кривая 2, ≈2,3 %), тогда как для асбестосодержащей композиции (кривая 3) оно достигает ≈4,0 %, т. е. в 2,1 раза выше. Наиболее интенсивный рост сорбции наблюдается в первые 5–10 ч; далее кривые выходят на пологий участок, что характерно для диффузионно-контролируемого процесса с насыщением. Сравнение кривых 1 и 2 на рис. 2 показывает, что микрокальцит не уступает базальту по водостойкости, а по абсолютному приросту массы несколько превосходит его, что может быть связано с шаровидной (изометричной) формой частиц $CaCO_3$ и их более равномерным распределением в матрице, затрудняющим образование непрерывных каналов сорбции. Для асбеста, напротив, волокнистая морфология и высокая удельная поверхность способствуют капиллярному подсосу влаги. Влияние природы связующего (рис. 3) выражено слабее: композиция на каучуковом связующем (кривая 1) сорбирует ≈1,3 % влаги, на мочевиноформальдегидном (кривая 2) — ≈1,7 % за 25 ч. Различие ≈0,4 абс. % объясняется большей гидрофильностью мочевиноформальдегидной смолы за счёт полярных гидроксильных и амидных групп, тогда как каучуковая матрица более гидрофобна.

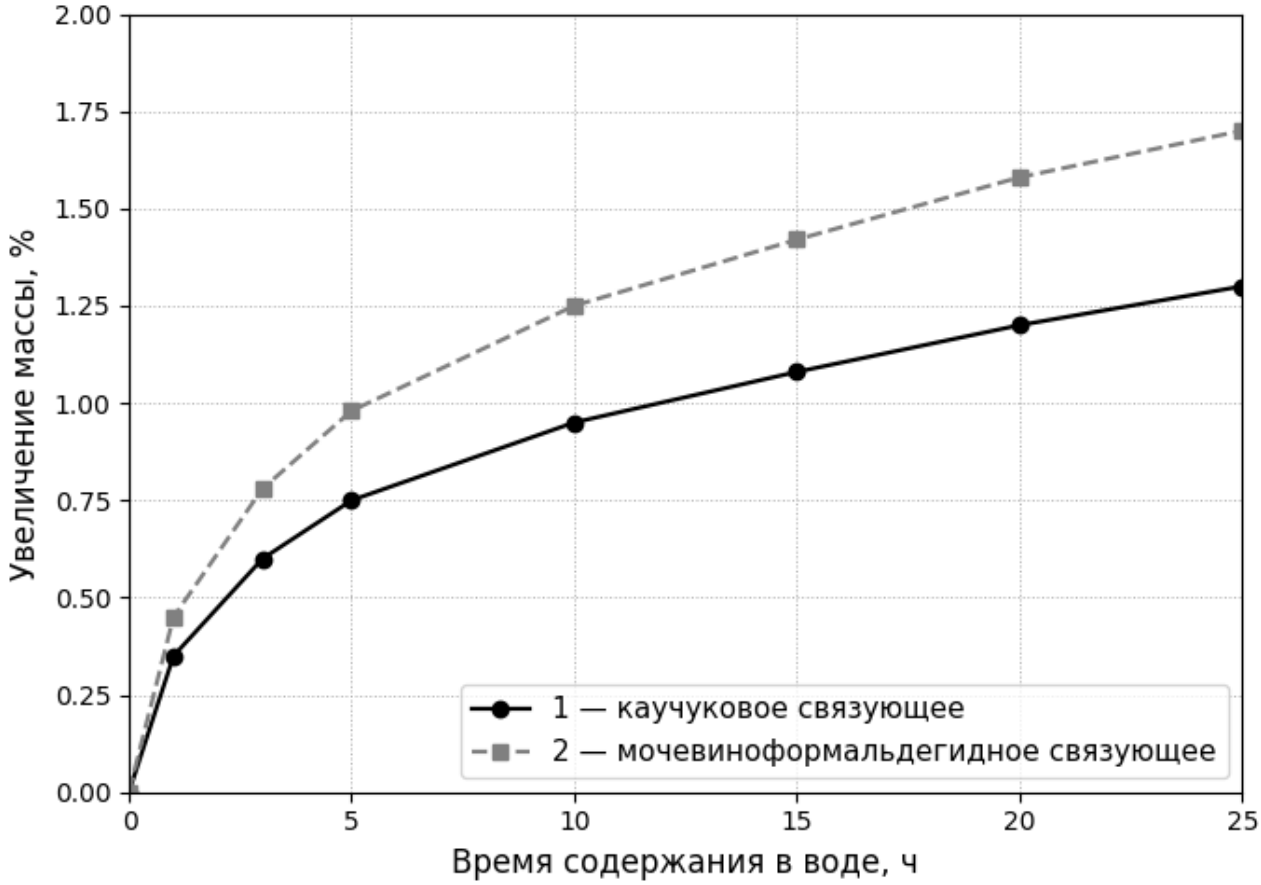


Рисунок 3. Зависимость увеличения массы модельного триботехнического композиционного полимерного материала на основе каучукового (1) и мочевиноформальдегидного связующего (2) от времени содержании в воде

Таким образом, введение микрокальцита обеспечивает снижение водопоглощения как за счёт гидрофобизующего действия карбоната кальция, так и за счёт структурирования матрицы: частицы наполнителя, равномерно распределённые в связующем (рис. 1), блокируют пути диффузии влаги. Полученные сорбционные данные согласуются с результатами микроскопии.

Заключение

В заключение можно утверждать, что, сравнивая кинетические кривые водопоглощения модельных композиций, можно заключить: введение микрокальцита (20 мас. ч.) снижает водопоглощение композиции до ≈1,9 % за 25 ч, что в 2,1 раза ниже, чем у композиции с асбестом (≈4,0 %), и сопоставимо с композицией с базальтом (≈2,3 %). Показано, что природа связующего влияет на сорбцию влаги слабее: каучуковое связующее обеспечивает водопоглощение ≈1,3 %, мочевиноформальдегидное — ≈1,7 %. Установленная закономерность объясняется изометричной формой частиц микрокальцита, их равномерным распределением в матрице и удовлетворительным смачиванием связующим, что подтверждено данными оптической микроскопии. Полученные результаты могут быть использованы при разработке и совершенствовании износостойких полимерных композиционных материалов фрикционного назначения.

Список литературы

1. Бузник В.М. и др. О работе междисциплинарного научного семинара« Композиты: технологии создания, исследование и оптимизация свойств, моделирование, применение» в 2022 г // Композиты и наноструктуры. – 2022. – Т. 14. – С. 246–251.
2. И.С. Хайдаров, Ф.А. Магрупов. Ю.А. Салимсаков. Композиция фрикционного назначения. Патент РУз IHDP 9700074.1от 28.01. – 1997.
3. Ибадуллаев А., Негматов С.С., Тешабаева Э.У. Влияние дисперсных наполнителей на вязкоупругие свойства невулканизованных эластомеров // Композиционные материалы. – 2003. – Т. 2. – С. 5–7.
4. Касперович А.В. и др. Методы химической модификации поверхности резинотехнических изделий // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17. – С. 225–230.
5. Мазитова А.К. и др. Наполнители для полимерных композиционных материалов // Нанотехнологии в строительстве. – 2022. – Т. 14.
6. Назаров Э.С., Турсунов А.Н.О. Перспективные достижения в области технологии композиционных материалов // Вестник науки и образования. – 2021. – С. 21–24.
7. Негматов С.С. и др. Модификации мочевиноформальдегидной смолы с реакционноспособными соединениями // Sanoatda raqamli texnologiyalar/Цифровые технологии в промышленности. – 2023. – Т. 1. – С. 122–127.
8. Непомнящих В.В. и др. О связи между поверхностной энергией полимера и механическими свойствами наполненных полиолефиновых композиций // Успехи в химии и химической технологии. – 2021. – Т. 35. – С. 53–55.
9. Талипов Н.Х., Абдуллаев М.А. Ў., Негматов С.С. Влияние микрокремнезема на свойства цементной композиции для производства материалов ячеистой структуры // Universum: технические науки. – 2025. – Т. 2. – С. 40–43.
10. Тилабов Б.К. и др. Юмшоқ ва қаттиқ металларни кескичлар билан кесиб ишлашда станокларнинг ўрни // Министерство высшего и среднего специального образования Республики Узбекистан Министерство инновационного развития Республики Узбекистан Академия наук Республики Узбекистан. – 2019.

References

1. Buznik V.M. i dr. [On the work of the interdisciplinary scientific seminar «Composites: creation technologies, research and optimization of properties, modeling, application» in 2022] // Kompozity i nanostruktury. – 2022. – Vol. 14. (In Russ.).
2. Khaydarov, F.A. Magrupov, Yu.A. Salimsakov. [Friction-purpose composition. UZ Patent IHDP 9700074.1 dated 28.01]. – 1997. (In Russ.).
3. Ibadullaev A., Negmatov S.S., Teshabaeva E.U. [Effect of dispersed fillers on the viscoelastic properties of unvulcanized elastomers] // Kompozitsionnye materialy. – 2003. – Vol. 2. (In Russ.).

4. Kasperovich A.V. i dr. [Methods of chemical modification of the surface of rubber products] // Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. – 2014. – Vol. 17. (In Russ.).
5. Mazitova A.K. i dr. [Fillers for polymer composite materials] // Nanotekhnologii v stroitel'stve. – 2022. – Vol. 14. (In Russ.).
6. Nazarov E.S., Tursunov A.N.O. [Promising achievements in the field of composite materials technology] // Vestnik nauki i obrazovaniya. – 2021. (In Russ.).
7. Negmatov S.S. i dr. [Modifications of urea-formaldehyde resin with reactive compounds] // Sanoatda raqamli texnologiyalar/Tsifrovye tekhnologii v promyshlennosti. – 2023. – Vol. 1. (In Russ.).
8. Nepomnyashchikh V.V. i dr. [On the relationship between the surface energy of a polymer and the mechanical properties of filled polyolefin compositions] // Uspekhi v khimii i khimicheskoj tekhnologii. – 2021. – Vol. 35. (In Russ.).
9. Talipov N.Kh., Abdullaev M.A. Ў., Negmatov S.S. [Effect of microsilica on the properties of a cement composition for the production of cellular-structure materials] // Universum: tekhnicheskie nauki. – 2025. – Vol. 2. (In Russ.).
10. Tilabov B.K. i dr. [The role of machine tools in cutting soft and hard metals with cutters] // Ministerstvo vysshego i srednego spetsial'nogo obrazovaniya Respubliki Uzbekistan Ministerstvo innovatsionnogo razvitiya Respubliki Uzbekistan Akademiya nauk Respubliki Uzbekistan. – 2019. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию: 24.10.2026
Статья принята к публикации: 27.10.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 665.58:339.543

DOI: 10.32743/UniTech.2026.152.11.23617

Оценка зубных паст по показателю относительной абразивности по дентину (RDA) и совершенствование их классификации в ТН ВЭД республики Узбекистан

Хамдамова Лобар Рустам кизи
базовый докторант
кафедры Пищевая безопасность и стандарты, Ташкентский химико-технологический институт
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: rustamovnarustamovna004@gmail.com

Хамракулов Махмуджон Гафурджанович
PhD, доц.
кафедры Пищевая безопасность и стандарты, Ташкентский химико-технологический институт
Республика Узбекистан, г. Ташкент
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3521-9163
E-mail: mahmud.gafurjanovich@gmail.com

Assessment of toothpastes by relative dentin abrasivity (RDA) and improvement of their classification in the commodity nomenclature of foreign economic activity of the republic of Uzbekistan

Khamdamova Lobar
Basic doctoral student
Department of Food Safety and Standards, Tashkent Institute of Chemical Technology
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Khamrakulov Makhmudjon
PhD, Associate Professor
Department of Food Safety and Standards, Tashkent Institute of Chemical Technology
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

Цель исследования – оценить, учитывается ли показатель относительной абразивности по дентину (RDA) при классификации зубных паст в Товарной номенклатуре внешнеэкономической деятельности Республики Узбекистан (ТН ВЭД, ред. 2022 г.), и предложить пути совершенствования классификации. Методы: сравнительный анализ ТН

Библиографическое описание: Хамдамова Л.Р. кизи, Хамракулов М.Г. Оценка зубных паст по показателю относительной абразивности по дентину (RDA) и совершенствование их классификации в ТН ВЭД республики Узбекистан // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23617

ВЭД, ГОСТ 7983 – 2016, ISO 11609:2017 и требований Американской стоматологической ассоциации (ADA), иерархический анализ структуры товарной позиции 3306, обобщение опубликованных значений RDA и твёрдости абразивов по шкале Мооса. Результаты: все средства для чистки зубов – гигиенические, лечебно-профилактические, детские, отбеливающие, угольные пасты и зубные порошки – классифицируются в одной подсубпозиции 3306 10 000 0 без национального деления. ГОСТ 7983 – 2016 не устанавливает численного предела абразивности, тогда как ISO 11609:2017 и ADA ограничивают RDA значением 250. Показано, что повышенная абразивность связана прежде всего с абразивами твёрже эмали (пемза, перлит, оксид алюминия, алмазный порошок), а также с размером частиц и содержанием абразива; RDA коммерческих паст одного типа различается в 2–3 раза. Предложено национальное деление подсубпозиции 3306 10 по виду абразива как косвенному признаку RDA и по назначению, а также введение четырёхклассной шкалы RDA в технический регламент, стандарт, сертификат соответствия и маркировку. Практическая значимость: предложения позволяют выделять группы повышенного риска в таможенной статистике и направлять на них лабораторный контроль.

Abstract

The aim of the study is to assess whether Relative Dentin Abrasivity (RDA) is taken into account when toothpastes are classified in the Commodity Nomenclature of Foreign Economic Activity of the Republic of Uzbekistan (2022 edition) and to propose ways to improve the classification. Methods: comparative analysis of the Nomenclature, GOST 7983 – 2016, ISO 11609:2017 and American Dental Association (ADA) requirements; hierarchical analysis of heading 3306; synthesis of published RDA values and Mohs hardness of abrasives. Results: all dentifrices – hygienic, therapeutic and preventive, children's, whitening and charcoal toothpastes and tooth powders – fall under a single subheading 3306 10 000 0 with no national subdivision. GOST 7983 – 2016 sets no numeric abrasivity limit, whereas ISO 11609:2017 and the ADA limit RDA to 250. Increased abrasivity is shown to be associated primarily with abrasives harder than enamel (pumice, perlite, aluminium oxide, diamond powder), as well as with particle size and abrasive content; the RDA of commercial toothpastes of the same type differs by a factor of 2–3. A national subdivision of subheading 3306 10 by abrasive type, as an indirect indicator of RDA, and by purpose is proposed, together with a four-class RDA scale in the technical regulation, standard, certificate of conformity and labelling. Practical significance: the proposals make it possible to identify high-risk groups in customs statistics and target laboratory control at them.

Ключевые слова: зубная паста, RDA, абразивность, ISO 11609, ТН ВЭД, классификация, твёрдость абразива.

Keywords: toothpaste, RDA, abrasivity, ISO 11609, commodity nomenclature, classification, abrasive hardness.

Финансирование: исследование выполнено без внешнего финансирования.

Funding: the study received no external funding.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

Благодарности: при подготовке рукописи использовалась модель искусственного интеллекта Claude (Anthropic) для поиска и обобщения литературы, структурирования текста, перевода на русский и английский языки и построения рисунков. Авторы проверили все факты, источники и выводы и несут за них полную ответственность.

Acknowledgements: the AI model Claude (Anthropic) was used in preparing the manuscript for literature search and synthesis, structuring the text, translation into Russian and English, and plotting the figures. The authors verified all facts, sources and conclusions and take full responsibility for them.

Введение

Зубная паста очищает зубы главным образом за счёт абразивов – мелких твёрдых частиц, которые механически удаляют налёт и пигментированные отложения с поверхности зубов. Наиболее распространёнными абразивами являются карбонат кальция (мел), гидратированный диоксид кремния, фосфаты кальция и гидрокарбонат натрия (пищевая сода) [4].

Однако абразив стирает не только налёт, но и ткани самого зуба. Особенно быстро истирается дентин – ткань, расположенная под эмалью и более мягкая, чем она. При рецессии десны и обнажении шейки зуба дентин оказывается под прямым воздействием щётки и пасты. Если паста чрезмерно абразивна, повышается чувствительность зубов и в пришеечной области возникают дефекты истирания.

Для количественной оценки абразивности пасты в мировой практике применяется показатель RDA (Relative Dentin Abrasivity – относительная абразивность по дентину). Метод его определения установлен стандартом ISO 11609:2017, а значение RDA не должно превышать 250 [5; 8]. Величина RDA определяется главным образом видом, твёрдостью и содержанием абразива в пасте [4; 6]. На рынке растёт доля отбеливающих и угольных паст, однако их RDA на упаковке практически не указывается.

Основная часть зубных паст поступает в Узбекистан по импорту. На таможенной границе каждому товару присваивается код ТН ВЭД, по которому ведётся таможенная статистика и партии повышенного риска направляются на лабораторный контроль. В настоящее время все зубные пасты – обычные, детские, отбеливающие и с твёрдыми абразивами – классифицируются в одной подсубпозиции 3306 10 000 0. В результате по таможенным данным невозможно выделить пасты, представляющие повышенный риск, и сосредоточить контроль именно на них.

Цель исследования – проанализировать классификацию зубных паст в ТН ВЭД с точки зрения показателя RDA и предложить классификацию и нормативные требования, позволяющие выделять группы повышенного риска.

Задачи исследования

1. проанализировать структуру товарной позиции 3306 ТН ВЭД (ред. 2022 г.) и относящиеся к ней примечания;

2. обобщить сущность, метод определения и предельные значения показателя RDA;
3. установить, с какими абразивными веществами связаны высокие значения RDA;
4. выявить различия между ГОСТ 7983 – 2016 и международными требованиями;
5. разработать предложения по изменению ТН ВЭД и нормативных документов.

Материалы и методы

Объект исследования – средства для чистки зубов (зубные пасты, гели и порошки), классифицируемые в подсубпозиции 3306 10 000 0 ТН ВЭД.

Источники: ТН ВЭД Республики Узбекистан (ред. 2022 г.; примечания к разделу VI, группам 30, 33 и 34) [3]; ГОСТ 7983 – 2016 «Пасты зубные. Общие технические условия» [1]; ISO 11609:2017 «Dentistry – Dentifrices – Requirements, test methods and marking» [8]; требования ADA [5]; рецензируемые публикации по RDA и абразивам [4; 6; 7; 9; 11; 12].

Методы: сравнительный анализ нормативных документов, иерархический анализ структуры ТН ВЭД, обобщение и систематизация опубликованных значений RDA и твёрдости абразивов по шкале Мооса.

Определение RDA. RDA – безразмерная величина, показывающая, во сколько раз испытуемая паста истирает дентин сильнее или слабее эталонного абразива. В качестве эталона принят пирофосфат кальция, значение RDA которого принимается равным 100 [5]. В классическом методе (Grabenstetter, 1958; Hefferren, 1976) облучённый нейтронами образец дентина подвергают чистке на стандартной машине и измеряют активность радиоактивного фосфора ^{32}P, перешедшего в суспензию [11]. В приложении B к ISO 11609:2017 приведён альтернативный профилометрический метод без радиоактивных материалов: глубину или объём истирания измеряют на 2D/3D-профилометре [6]. RDA рассчитывают по формуле (1):

$$RDA = \frac{A_s}{A_r} \bullet 100 \quad (1)$$

где RDA – относительная абразивность по дентину, безразмерная величина; A_s – истирание дентина после чистки суспензией испытуемой пасты (в радиометрическом методе – активность ^{32}P в суспензии, имп/мин; в профилометрическом – средняя глубина, мкм, или объём истирания, мкм^3); A_r – истирание, полученное в тех же условиях с эталонным абразивом (пирофосфатом кальция), в тех же единицах; 100 – условное значение, присвоенное эталону.

Формула показывает, на сколько процентов паста истирает дентин сильнее или слабее эталона: при RDA = 150 паста истирает дентин в 1,5 раза сильнее эталона. Аналогично определяют REA (относительную абразивность по эмали), используя в качестве образца эмаль. Условия испытаний стандартизованы: по ISO 11609 25 г пасты суспендируют в 40 мл деионизированной воды [12]; для каждого образца испытывают не менее шести образцов ткани [6].

Результаты и обсуждение

1. Действующая классификация зубных паст в ТН ВЭД (ред. 2022 г.)

В ТН ВЭД все средства для чистки зубов относятся к одному десятизначному коду – **3306 10 000 0** «средства для чистки зубов», внутри которого национальное деление отсутствует [3, с. 267]. Дополнительная единица измерения не установлена, т. е. статистика ведётся только по массе нетто (табл. 1).

Таблица 1. Структура товарной позиции 3306 в ТН ВЭД (ред. 2022 г.)

Код ТН ВЭД	Наименование позиции	Доп. ед. изм.
3306	Средства для гигиены полости рта или зубов, включая порошки и пасты для облегчения закрепления зубных протезов; нити, используемые для очистки межзубных промежутков (зубные нити), в индивидуальной упаковке для розничной продажи	–
3306 10 000 0	– средства для чистки зубов	–
3306 20 000 0	– нити, используемые для очистки межзубных промежутков (зубные нити)	–
3306 90 000 0	– прочие	–

На классификацию влияют следующие примечания [3]:

– **примечание 1(д) к группе 30:** препараты товарных позиций 3303–3307 не включаются в группу 30 (лекарственные средства), даже если обладают терапевтическими или профилактическими свойствами; следовательно, лечебно-профилактические пасты остаются в позиции 3306;

– **примечание 2 к разделу VI:** товары позиции 3306, расфасованные в отмеренные дозы или для розничной продажи, включаются только в эту позицию;

– **примечание 3 к группе 33:** в позиции 3303–3307 включаются продукты, пригодные для использования в качестве товаров этих позиций и расфасованные для розничной продажи;

– **примечание 1(в) к группе 34:** средства для чистки зубов, содержащие поверхностно-активные вещества, включаются не в группу 34, а в позицию 3306.

В результате в одном коде объединены продукты, резко различающиеся по составу, назначению и уровню риска: гигиеническая паста без фторидов, паста с 1450 ppm фторида, детская паста, применяемая с шести месяцев, отбеливающая паста с пероксидом, угольная паста и зубной порошок. Таможенная статистика не позволяет выделить объёмы импорта этих групп, а система управления рисками – назначить им отдельные профили.

Вместе с тем в той же группе 33 имеются прецеденты национального деления: **3305 90 000 1** (лосьоны для волос) и **3305 90 000 9** (прочие), **3307 90 000 1, …2, …8** (растворы и капли для контактных линз) [3, с. 267]. Это показывает, что деление 3306 10 на уровне десятого знака технически возможно.

2. Показатель RDA: предельные значения и данные по рынку

Верхний предел безопасности RDA составляет **250**: этот предел применяют ISO 11609:2017 и ADA, все пасты с меньшим значением считаются безопасными для регулярного применения [5; 8]. Предел исторически сложился в результате согласования между ADA, государственными органами США и производителями [11]. ADA подчёркивает, что значения ниже 250 не предназначены для ранжирования паст по безопасности [5], – это учтено в предложениях по классификации.

На практике стоматологи и производители используют условную шкалу, приведённую в табл. 2; в международном стандарте она не закреплена, но широко распространена.

Таблица 2. Условная шкала абразивности зубных паст по RDA, применяемая на практике

Диапазон RDA	Уровень абразивности	Для кого подходит
0–70	Низкий	Чувствительные зубы, обнажённый дентин, дети, эрозия
71–100	Средний	Ежедневное применение
101–150	Высокий	Здоровая эмаль, кратковременное применение
151–250	Очень высокий (у предела)	Ежедневное применение не рекомендуется
> 250	Выше допустимого предела	Не соответствует ISO 11609 / ADA

Исследования показывают, что RDA сильно различается даже внутри одного типа продукции. J. Enax и соавт. (2023) по ISO 11609 установили для пяти коммерческих паст RDA = 48–88, а при увеличении содержания гидратированного диоксида кремния с 2,5 до 10 % – линейный рост RDA с 33 до 66 [6]. Для угольных паст приводятся значения от 50 до 120 [7]. Следовательно, название «отбеливающая» или «угольная» не даёт надёжной информации об абразивности – её можно узнать только измерением (рис. 1).

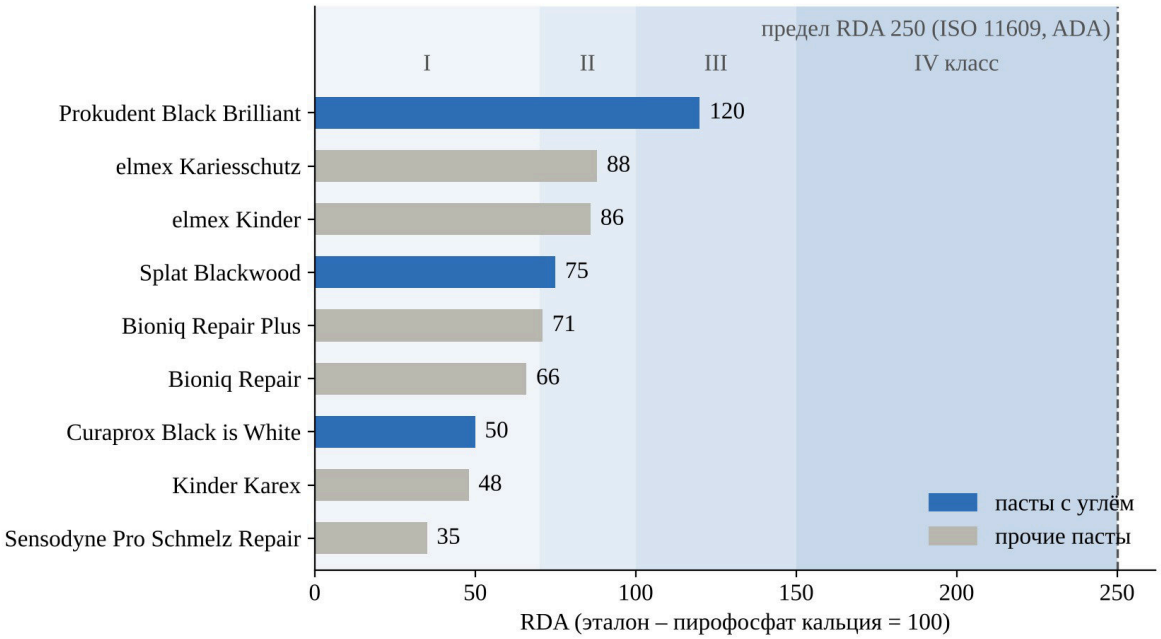


Рисунок 1. Значения RDA коммерческих зубных паст на фоне предлагаемых классов
Источник: составлено авторами по данным [6] (5 паст, ISO 11609) и [7] (4 пасты, данные из внешних источников)

Доказано также, что RDA как единственный показатель недостаточен. G. Johannsen и соавт. (2013) наблюдали, что паста с RDA = 170 вызывала бóльшую шероховатость (Ra) и объёмную потерю, чем паста с RDA = 250, и рекомендовали оценивать шероховатость наряду с RDA [9]. M. Zehnder и соавт. (2020) установили, что RDA кислой пасты (pH = 5,0) составил 64 в воде и 56 в буферном растворе, т. е. метод ISO завышает абразивность кислых паст примерно на 14 % [12]. Поэтому для классификации наряду с RDA важны **REA, pH и содержание фторидов**.

3. Вещества, определяющие высокие значения RDA

Высокий RDA прежде всего связан с видом абразивного наполнителя: чем твёрже абразив, крупнее его частицы и выше его содержание, тем сильнее истирается дентин [4]. Абразивы зубных паст делят на четыре группы: карбонаты (гидрокарбонат натрия, карбонат кальция), соединения кремния (гидратированный диоксид кремния), фосфаты (дикальцийфосфат, пирофосфат кальция, метафосфат натрия) и оксид алюминия [4]. К ним добавляются встречающиеся в отбеливающих пастах пемза, перлит (вулканическое стекло), алмазный порошок и активированный уголь.

Твёрдость дентина по шкале Мооса составляет 2,0–2,5, эмали – 3,5 [4]; в другом источнике для эмали приводится значение 5 [10]. Абразив твёрже эмали способен истирать не только дентин, но и эмаль (рис. 2).

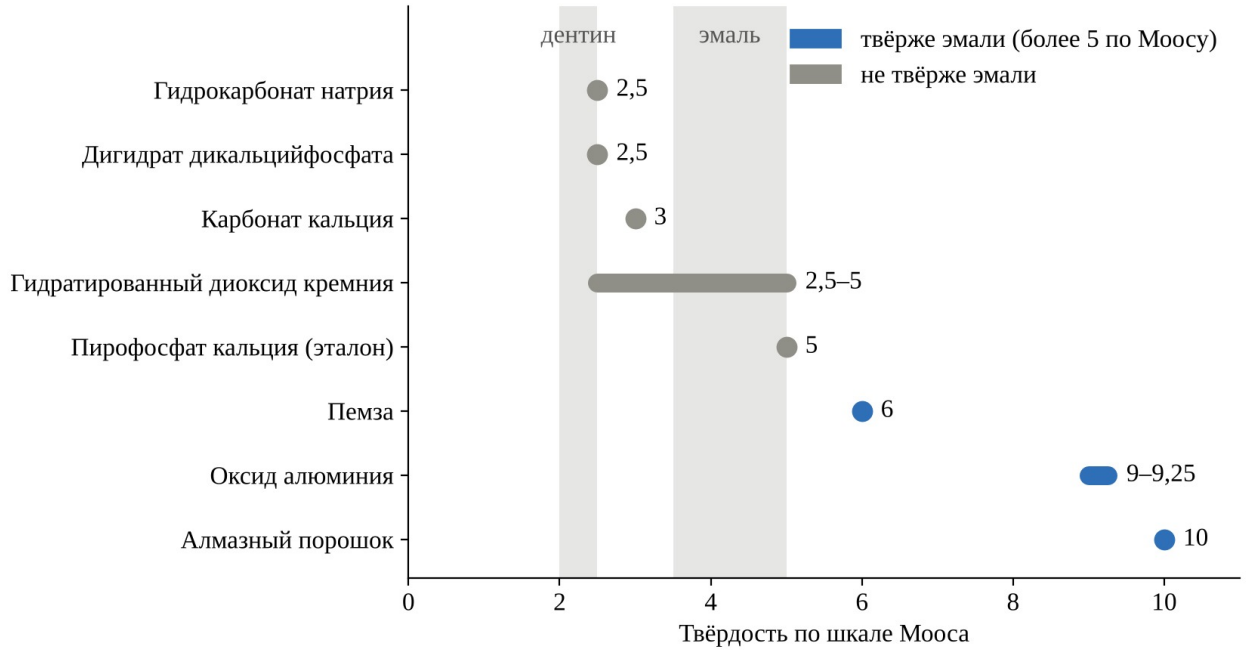


Рисунок 2. Твёрдость абразивов зубных паст по шкале Мооса в сравнении с дентином и эмалью

Источник: составлено авторами по данным [4]; для пемзы, алмазного порошка и нижнего значения оксида алюминия – по [10]

Из рис. 2 видно, что абразивы чётко делятся на две группы: основные абразивы ежедневных паст (карбонаты, фосфаты, диоксид кремния) не превышают твёрдости эмали, тогда как пемза, оксид алюминия и алмазный порошок значительно твёрже её. Влияние отдельных абразивов на RDA обобщено в табл. 3.

Таблица 3. Влияние абразивов на RDA и их идентификация

Абразив (наименование INCI)	**Влияние на RDA**	**Примечание**
Гидрокарбонат натрия (Sodium Bicarbonate), дигидрат дикальцийфосфата (Dicalcium Phosphate Dihydrate)	Низкое	На уровне твёрдости дентина
Карбонат кальция (Calcium Carbonate)	Низкое–среднее	Зависит от размера частиц
Гидратированный диоксид кремния (Hydrated Silica)	Низкое–высокое	Зависит от типа (очищающий или загущающий) и содержания: при 2,5–10 % RDA 33–66 [6]
Пирофосфат кальция (Calcium Pyrophosphate)	Эталон	RDA принят равным 100 [4]
Активированный уголь (Charcoal Powder)	Низкое–высокое	RDA 50–120 [7]; применяется вместе с другими абразивами
Пемза (Pumice), перлит (Perlite), оксид алюминия (Alumina), алмазный порошок (Diamond Powder)	Высокий риск	Твёрже эмали; в основном в отбеливающих и «профессиональных» пастах

Вместе с тем вид абразива не определяет RDA полностью. При увеличении содержания одного и того же гидратированного диоксида кремния с 2,5 до 10 % RDA возрастает вдвое [6], а угольные пасты распределяются в диапазоне от 50 до 120 [7]. Следовательно, вид абразива может служить **косвенным признаком** риска высокого RDA, а точное значение устанавливается только измерением.

Для классификации существенно, что вид абразива указывается в составе INCI на маркировке и сравнительно быстро подтверждается в лаборатории рентгенофазовым анализом или микроскопией, тогда как измерение RDA требует многодневных испытаний на образцах дентина. Поэтому группу повышенного риска по RDA можно выделить в ТН ВЭД через вид абразива (п. 5.1).

4. Пробелы в нормативной базе

ГОСТ 7983 – 2016 (Узбекистан голосовал за его принятие) нормирует pH, содержание фторидов и рекомендуемое содержание фторидов в зависимости от возраста, но не устанавливает численного предела абразивности [1]. Стандарт лишь требует, чтобы абразивность наполнителей была известна (п. 3.2.3) и чтобы паста не повреждала эмаль и мягкие ткани (п. 4.2). Требование «не повреждать» не переведено в измеряемый критерий (табл. 4).

Таблица 4. Отражение показателей безопасности зубных паст в документах

Показатель	ГОСТ 7983-2016	ISO 11609:2017 / ADA	ТН ВЭД 2022 (3306 10)
RDA	Численного предела нет; «не должна повреждать эмаль»	≤ 250	Не учитывается
pH	4,5–10,5; при pH < 5,5 подтверждается отсутствие деминерализации	–	Не учитывается
Фториды (по F)	≤ 0,15 %; рекомендуется: 6 мес.–2 года 0,05 %, 2–6 лет 0,1 %, старше 6 лет 0,145 %	ADA: испытания высвобождения и поглощения фторида	Не учитывается
Предупреждение для детей	Обязательно при F 0,1–0,15 %	–	Не учитывается

В Российской Федерации введён национальный стандарт на определение абразивности зубных паст с помощью ротационной машины трения и бесконтактной оптической 3D-профилометрии; разработчики в качестве недостатков метода RDA указали использование радиоактивных материалов, погрешность измерений и малое число таких лабораторий [2]. Это свидетельствует о признании в регионе необходимости измерять абразивность на национальном уровне.

В Узбекистане же: 1) отсутствует открытая информация об аккредитованной испытательной лаборатории по абразивности; 2) при сертификации показатель RDA не требуется; 3) потребитель не может узнать уровень абразивности по маркировке; 4) таможенная статистика не выделяет группы риска.

5. Предложения

Предложения сформулированы на двух уровнях: **в ТН ВЭД** – проверяемые на таможне косвенные признаки риска высокого RDA (форма, назначение и вид абразива); **в техническом регламенте, стандарте и маркировке** – измеренное значение и класс RDA. Сам показатель RDA не может быть критерием кода: Гармонизированная система классифицирует товар по внешним признакам и составу, а RDA требует многодневных лабораторных испытаний на образцах дентина. Как показано в разделе 3, пасты с наибольшим риском по RDA связаны с абразивами твёрже эмали, которые указываются в составе INCI. Поэтому в код включается вид абразива, а точное значение RDA подтверждается сертификатом.

5.1. Деление подсубпозиции 3306 10 по виду абразива и назначению

Таблица 5. Предлагаемая структура подсубпозиции 3306 10 000

Предлагаемый код	Наименование позиции	Критерий деления и способ проверки
3306 10 000 1	– – зубные порошки	Форма: порошок (визуальный осмотр)
	– – зубные пасты и гели:	
3306 10 000 2	– – – содержащие абразивы твёрже эмали (более 5 по шкале Мооса: пемза, перлит, оксид алюминия, алмазный порошок)	Состав INCI; подтверждается рентгенофазовым анализом или микроскопией
3306 10 000 3	– – – прочие, предназначенные для детей	На маркировке указан возраст
3306 10 000 4	– – – прочие, отбеливающие (содержащие пероксиды или активированный уголь)	Состав INCI
3306 10 000 9	– – – прочие	–

Классификация осуществляется по первому подходящему коду, поэтому группа с наибольшим риском по RDA стоит первой: и отбеливающая паста с оксидом алюминия, и детская паста с пемзой включаются в 3306 10 000 2, а детская паста с фторидом – в 3306 10 000 3. Содержание фторидов не связано с RDA, поэтому оно исключено из критериев кода и сохранено как требование технического регламента и маркировки. Такое деление соответствует существующей практике группы 33 (3305 90 000 1/9, 3307 90 000 1/2/8) и не затрагивает первые шесть знаков Гармонизированной системы.

Ожидаемый результат: импорт паст повышенного риска по RDA (с твёрдыми абразивами), детских и отбеливающих паст отражается в отдельной статистике. Система управления рисками может автоматически назначать лабораторный контроль партиям кода 3306 10 000 2, для которых не задекларирован класс RDA. Тем самым анализ RDA и предложение нового кода объединяются единой логикой: код выделяет группу риска, класс RDA количественно её подтверждает.

5.2. Четырёхклассная шкала RDA (на уровне технического регламента и стандарта)

Таблица 6. Классы RDA и связанные с ними требования (предложение)

Класс	RDA	Надпись на маркировке	Обязательное требование
I	≤ 70	«Низкоабразивная»	Детские пасты и пасты с заявлением «для чувствительных зубов» должны относиться только к этому классу
II	71–100	«Среднеабразивная»	Для ежедневного применения
III	101–150	«Высокоабразивная»	Предупреждение: не рекомендуется при чувствительных зубах и обнажённом дентине
IV	151–250	«Очень высокоабразивная»	Предупреждение + не предназначена для детей; ежедневное применение не рекомендуется
–	> 250	–	Не допускается к обращению (ISO 11609, ADA)

Границы классов основаны на практической шкале табл. 2. Классы представляются не как рейтинг «более безопасных» паст, а как информация для выбора потребителя, поскольку ADA рекомендует не использовать значения ниже 250 для ранжирования безопасности [5].

5.3. Практические шаги по внедрению

1. Разработать на основе ГОСТ 7983 – 2016 национальный стандарт (O‘z DSt) или изменение к нему, включив предел RDA ≤ 250, обязательное декларирование класса RDA и REA.

2. В техническом регламенте о безопасности парфюмерно-косметической продукции установить для зубных паст RDA, pH и содержание фторидов в качестве обязательных показателей.

3. Требовать указания в сертификате соответствия значения RDA, класса и метода испытаний (радиометрического или профилометрического по приложению B к ISO 11609).

4. Создать аккредитованную испытательную лабораторию, работающую профилометрическим методом без радиоактивных материалов.

5. Ввести в ТН ВЭД национальные подсубпозиции табл. 5 и связать их с классом RDA в системе управления рисками: партиям кодов 3306 10 000 2, 3306 10 000 3 и 3306 10 000 4 без задекларированного класса RDA назначается лабораторный контроль.

6. Для кислых паст (pH < 5,5) рассмотреть определение RDA в буферном растворе в качестве дополнительного метода [12].

Заключение

1. В ТН ВЭД (ред. 2022 г.) все средства для чистки зубов объединены в одном коде 3306 10 000 0; в силу примечания 1(д) к группе 30 в нём остаются и лечебно-профилактические пасты. В результате продукты с разным уровнем риска не разделяются ни в статистике, ни в управлении рисками.

2. RDA – основной количественный показатель безопасности зубной пасты; ISO 11609:2017 и ADA устанавливают его верхний предел 250. RDA паст на рынке различается в несколько раз даже внутри одного типа продукции и не может быть определён по названию. Высокий RDA связан прежде всего с абразивами твёрже эмали (пемза, перлит, оксид алюминия, алмазный порошок), а также с крупностью и содержанием абразивных частиц.

3. ГОСТ 7983 – 2016 не устанавливает численного предела абразивности; RDA не требуется ни при сертификации, ни в маркировке.

4. Предлагается разделить подсубпозицию 3306 10 ТН ВЭД на пять национальных подсубпозиций по виду абразива как косвенному признаку риска RDA и по назначению (порошки, пасты с твёрдыми абразивами, детские, отбеливающие и прочие пасты), а RDA в виде четырёхклассной шкалы включить в технический регламент, стандарт, сертификат и маркировку. Оба уровня связываются через систему управления рисками.

5. На следующем этапе планируется экспериментальное определение RDA, REA, pH и содержания фторидов зубных паст рынка Узбекистана по приложению B к ISO 11609 и проверка предложенных классов на практических данных.

Список литературы

1. ГОСТ 7983–2016. Пасты зубные. Общие технические условия: межгосударственный стандарт. – Текст: электронный // Meganorm: [сайт] [Электронный ресурс]. URL: https://meganorm.ru/mega_doc/norm/gost_gosudarstvennyj-standart/12/gost_7983-2016_mezhgosudarstvennyy_standart_pasty_zubnye.html (дата обращения: 19.10.2026).
2. ГОСТ на метод определения абразивности зубных паст вступил в силу [Электронный ресурс]. // Новости Mail.ru: [сайт]. URL: https://news.mail.ru/economics/71091930/ (дата обращения: 19.10.2026).
3. Ўзбекистон Республикаси ташқи иқтисодий фаолиятининг товар номенклатураси (2022 йил таҳрири). – Тошкент: Инвестициялар, саноат ва савдо вазирлиги; Божхона қўмитаси, 2022. – 785 с.
4. Ali S., Farooq I., Shahid F., Hassan U., Zafar M.S. Common toothpastes abrasives and methods of evaluating their abrasivity // Journal of Oral Research. – 2020. – № 1. – P. 9–15. – DOI: 10.17126/joralres.2020.055.
5. American Dental Association. Toothpastes(date of access: 19.10.2026) [Электронный ресурс]. URL: https://www.ada.org/resources/ada-library/oral-health-topics/toothpastes.
6. Enax J., Meyer F. Schulze zur Wiesche E., Fuhrmann I.C., Fabritius H.-O. Toothpaste abrasion and abrasive particle content: correlating high-resolution profilometric analysis with Relative Dentin Abrasivity (RDA) // Dentistry Journal. – 2023. – T. 11, № 3. – DOI: 10.3390/dj11030079.
7. Greuling A., Emke J.M., Eisenburger M. Abrasion behaviour of different charcoal toothpastes when using electric toothbrushes // Dentistry Journal. – 2021. – T. 9, № 8. – DOI: 10.3390/dj9080097.
8. ISO 11609:2017. Dentistry – Dentifrices – Requirements, test methods and marking. – Geneva: ISO, 2017.

9. Johannsen G., Tellefsen G., Johannsen A., Liljeborg A. The importance of measuring toothpaste abrasivity in both a quantitative and qualitative way // Acta Odontologica Scandinavica. – 2013. – DOI: 10.3109/00016357.2012.696693.
10. Mohs Hardness of Abrasives. – Reade Advanced Materials, 2023.(date of access: 19.10.2026) [Электронный ресурс]. URL: https://reade.com/wp-content/uploads/2023/10/Mohs_Hardness_of_Abrasives.pdf.
11. St John S., White D.J. History of the development of abrasivity limits for dentifrices // The Journal of Clinical Dentistry. – 2015. – T. 26, № 2. – P. 50–54.
12. Zehnder M., Masoch L., Gubler A., Mohn D., Attin T., Wegehaupt F.J. Buffer solution reduces acidic toothpaste abrasivity measured in standardized tests // Frontiers in Dental Medicine. – 2020. – T. 1. – Art. 612298. – DOI: 10.3389/fdmed.2020.612298.

References

1. GOST 7983 Pasty zubnye. Obshchie tekhnicheskie usloviya [Toothpastes. General specifications]. Available at: [Электронный ресурс]. – 2016. – URL: https://meganorm.ru/mega_doc/norm/gost_gosudarstvennyj-standart/12/gost_7983-2016_mezhgosudarstvennyy_standart_pasty_zubnye.html (accessed: 19.10.2026). (In Russ.).
2. GOST na metod opredeleniya abrazivnosti zubnykh past vstupil v silu [The standard on the method for determining the abrasivity of toothpastes has entered into force]. Novosti Mail.ru. Available at: [Электронный ресурс]. – URL: https://news.mail.ru/economics/71091930/ (accessed: 19.10.2026). (In Russ.).
3. O‘zbekiston Respublikasi tashqi iqtisodiy faoliyatining tovar nomenklaturasi (2022 yil tahriri) [Commodity Nomenclature of Foreign Economic Activity of the Republic of Uzbekistan (2022 edition)]. Tashkent, 2022. 785 P. (In Uzbek).
4. Ali S., Farooq I., Shahid F., Hassan U., Zafar M.S. Common toothpastes abrasives and methods of evaluating their abrasivity // Journal of Oral Research. – 2020. – No. 1. – P. 9–15. – DOI: 10.17126/joralres.2020.055.
5. American Dental Association. Toothpastes. Available at: [Электронный ресурс]. – URL: https://www.ada.org/resources/ada-library/oral-health-topics/toothpastes (accessed: 19.10.2026).
6. Enax J., Meyer F., Schulze zur Wiesche E., Fuhrmann I.C., Fabritius H.-O. Toothpaste abrasion and abrasive particle content: correlating high-resolution profilometric analysis with Relative Dentin Abrasivity (RDA). Dentistry Journal, 2023, vol. 11, no. 3, art. 79. DOI: 10.3390/dj11030079.
7. Greuling A., Emke J.M., Eisenburger M. Abrasion behaviour of different charcoal toothpastes when using electric toothbrushes. Dentistry Journal, 2021, vol. 9, no. 8, art. 97. DOI: 10.3390/dj9080097.
8. ISO 11609:2017. Dentistry – Dentifrices – Requirements, test methods and marking. Geneva, ISO, 2017.

9. Johannsen G., Tellefsen G., Johannsen A., Liljeborg A. The importance of measuring toothpaste abrasivity in both a quantitative and qualitative way. Acta Odontologica Scandinavica. – 2013. – DOI: 10.3109/00016357.2012.696693.
10. Mohs Hardness of Abrasives. Reade Advanced Materials, 2023. Available at: [Электронный ресурс]. – URL: https://reade.com/wp-content/uploads/2023/10/Mohs_Hardness_of_Abrasives.pdf (accessed: 19.10.2026).
11. St John S., White D.J. History of the development of abrasivity limits for dentifrices. The Journal of Clinical Dentistry, 2015, vol. 26, no. 2, P. 50–54.
12. Zehnder M., Masoch L., Gubler A., Mohn D., Attin T., Wegehaupt F.J. Buffer solution reduces acidic toothpaste abrasivity measured in standardized tests. Frontiers in Dental Medicine, 2020, vol. 1, art. 612298. DOI: 10.3389/fdmed.2020.612298.

Статья поступила в редакцию: 08.11.2026
Статья принята к публикации: 15.11.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 674.048:678.026:543.57:614.841

Термический анализ огнезащитных покрытий на основе жидкого стекла для древесных материалов до и после огневого воздействия

Холикулов Шохрух Пирнафас угли
докторант (PhD)
Ташкентский научно-исследовательский институт химической технологии
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Нуркулов Файзулла Нурмуминович
д-р техн. наук, проф.
Ташкентский научно-исследовательский институт химической технологии
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: shoxruxze0@gmail.com

Джалилов Абдулахат Турапович
д-р хим. наук, проф., акад. АН РУз, директор
Ташкентский научно-исследовательский институт химической технологии
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Thermal analysis of liquid-glass-based fire-retardant coatings for wood materials before and after fire exposure

Kholikulov Shokhrukh Pirnafas ugli
PhD student
Tashkent Scientific Research Institute of Chemical Technology
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Nurkulov Fayzulla Nurmuminovich
doctor of Technical Sciences, Professor
Tashkent Scientific Research Institute of Chemical Technology
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Djalilov Abdulakhat Turapovich
doctor of Chemical Sciences, Professor
Academician of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Director, Tashkent Scientific Research Institute of Chemical Technology
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

Цель работы – установить закономерности термического разложения двух огнезащитных покрытий на основе жидкого стекла – АР-200 и АР-250, предназначенных для древесных материалов, и оценить изменения в остатке покрытия после огневого испытания.

Библиографическое описание: Холикулов Ш.П.У., Нуркулов Ф.Н., Джалилов А.Т. Термический анализ огнезащитных покрытий на основе жидкого стекла для древесных материалов до и после огневого воздействия // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23732

Покрытия исследованы в двух состояниях – после нанесения на древесину и сушки и после огневого испытания по ГОСТ 16363-98 – методами термогравиметрического (ТГА) и дифференциального термического анализа (ДТА) на приборе Shimadzu DTG-60 в интервале 27–800 °C. Высушенное покрытие АР-200 теряет до 800 °C 59,64 % массы (остаток 40,36 %); основная часть разложения (38,93 %) приходится на область до 310 °C с максимумом скорости при 259 °C. У покрытия АР-250, содержащего борсодержащую добавку, общая потеря массы в 2,4 раза меньше – 24,67 % (остаток 75,33 %), стадия резкого разложения отсутствует. После огневого испытания потеря массы на низкотемпературной стадии снижается у АР-200 с 38,93 до 10,21 %, у АР-250 – с 15,07 до 3,05 %, а температура потери 20 % массы возрастает с 218 до 463 °C и с 456 до 611 °C соответственно. Следовательно, газо- и парообразующие компоненты покрытий расходуются под действием пламени, а на поверхности остаётся термически устойчивый минерально-углеродный слой. Результаты согласуются с I группой огнезащитной эффективности обоих покрытий и подтверждают более высокую термическую стабильность АР-250. Данные могут использоваться при выборе рецептуры огнезащитных покрытий для деревянных конструкций.

Abstract

The aim of the work is to establish the thermal decomposition behaviour of two liquid-glass-based fire-retardant coatings for wood materials, AP-200 and AP-250, and to assess the changes in the coating residue after a fire test. The coatings were studied in two states – after application to wood and drying, and after the fire test according to GOST 16363-98 – by thermogravimetric analysis (TGA) and differential thermal analysis (DTA) on a Shimadzu DTG-60 instrument in the range 27–800 °C. The dried AP-200 coating loses 59.64 % of its mass up to 800 °C (residue 40.36 %); most of the decomposition (38.93 %) occurs below 310 °C, with the maximum rate at 259 °C. For the AP-250 coating, which contains a boron-based additive, the total mass loss is 2.4 times lower – 24.67 % (residue 75.33 %), and no sharp decomposition stage is observed. After the fire test the mass loss in the low-temperature stage decreases from 38.93 to 10.21 % for AP-200 and from 15.07 to 3.05 % for AP-250, while the 20 % mass-loss temperature rises from 218 to 463 °C and from 456 to 611 °C, respectively. Consequently, the gas- and vapour-releasing components of the coatings are consumed under flame exposure, leaving a thermally stable mineral–carbonaceous layer on the surface. The results agree with the group I fire-retardant efficiency of both coatings and confirm the higher thermal stability of AP-250. The data can be used when selecting fire-retardant coating formulations for timber structures.

Ключевые слова: огнезащитное покрытие, древесные материалы, жидкое стекло, термогравиметрический анализ, дифференциальный термический анализ, термическая стабильность, коксовый остаток.

Keywords: fire-retardant coating, wood materials, liquid glass, thermogravimetric analysis, differential thermal analysis, thermal stability, char residue.

Финансирование: Исследование выполнено без внешнего финансирования.

Funding: This research received no external funding.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

Введение

Древесные материалы широко применяются в строительстве, производстве мебели и отделке помещений. Главный их недостаток – горючесть: при нагревании компоненты древесины разлагаются с образованием горючих газов и угольного остатка [7]. Поэтому огнезащита древесных материалов остаётся важной задачей пожарной безопасности.

Наиболее распространённый способ защиты – нанесение на поверхность огнезащитного покрытия [3, 6, 9]. Покрытие действует по трём направлениям: его компоненты разлагаются с поглощением тепла и охлаждают поверхность; выделяющиеся водяной пар и негорючие газы разбавляют горючие газы; на поверхности формируется слой, затрудняющий перенос тепла и кислорода [4, 8]. Среди экологически безопасных систем выделяются покрытия на основе жидкого стекла (силиката натрия): они дёшевы, не содержат галогенов и при высокой температуре образуют стекловидный слой [5, 2]. Азотсодержащие и минеральные добавки усиливают их защитное действие [10, 12].

Объекты настоящей работы получены в предыдущем исследовании авторов [13]. В нём на основе жидкого стекла разработаны шесть огнезащитных составов – АР-200, АР-210, АР-220, АР-230, АР-240 и АР-250, которые различаются модифицирующими добавками. Все составы наносили на образцы древесины и испытывали по ГОСТ 16363-98 [1]; по этому стандарту покрытие относится к I группе огнезащитной эффективности, если потеря массы образца не превышает 9 %. Необработанная древесина теряла в среднем 69,48 % массы, образцы с покрытиями – от 7,9 до 24,9 %. Требованию I группы отвечали только два состава: АР-200 (потеря массы 8,5 %) и АР-250 (7,9 %). Эти два покрытия и выбраны для дальнейшего изучения.

Огневое испытание показывает только итоговую потерю массы образца. Оно не отвечает на вопросы, при каких температурах разлагается само покрытие, сколько летучих продуктов оно выделяет и какой остаток сохраняется на поверхности после действия пламени. Такие сведения дают термогравиметрический (ТГА) и дифференциальный термический анализ (ДТА) [7, 11]. При этом в литературе покрытия исследуют преимущественно в исходном состоянии, а сопоставление одного и того же покрытия до и после огневого воздействия встречается редко.

Цель работы – изучить методами ТГА и ДТА термическое разложение покрытий АР-200 и АР-250 до и после огневого испытания и связать полученные результаты с их огнезащитной эффективностью.

Материалы и методы

Исследованы два огнезащитных покрытия на основе натриевого жидкого стекла. Оба содержат азотсодержащий компонент и минеральный наполнитель; покрытие АР-200 дополнительно включает полимерную плёнкообразующую добавку, покрытие АР-250 – борсодержащую добавку [13]. Покрытия наносили кистью на образцы древесины и сушили 24 ч при комнатной температуре.

От каждого покрытия отбирали две пробы: «до испытания» – порошок высушенного покрытия, снятый с поверхности древесины; «после испытания» – остаток покрытия, снятый с поверхности образца древесины после его огневого испытания по ГОСТ 16363-98.

Кривые ТГА и ДТА регистрировали одновременно на термоанализаторе DTG-60 (Shimadzu, Япония) в интервале 27–800 °C при скорости нагрева около 10 °C/мин. Масса навесок составляла 0,98–4,24 мг. Границы стадий, потери массы, характеристические температуры и тепловые эффекты определяли в программном обеспечении прибора. Положительный тепловой эффект соответствует экзотермическому процессу, отрицательный – эндотермическому.

Для сопоставления образцов кривые ТГА пересчитывали в проценты от исходной массы:

$$W_T = \frac{m_T}{m_0} \cdot 100\ \%,$$

где m_0 – исходная масса навески, мг; m_T – масса при температуре T, мг. Скорость потери массы (%/°C) получали дифференцированием сглаженных кривых. Показателями термической стабильности служили температура потери 20 % массы (T_{20}) и остаток при 800 °C [11].

Результаты и обсуждение

Термограммы покрытий приведены на рисунках 1 и 2, обобщённые данные – в таблицах 1 и 2. Во всех образцах выделяются три стадии потери массы: I – до 280–310 °C, II – до 570–590 °C, III – до 800 °C.

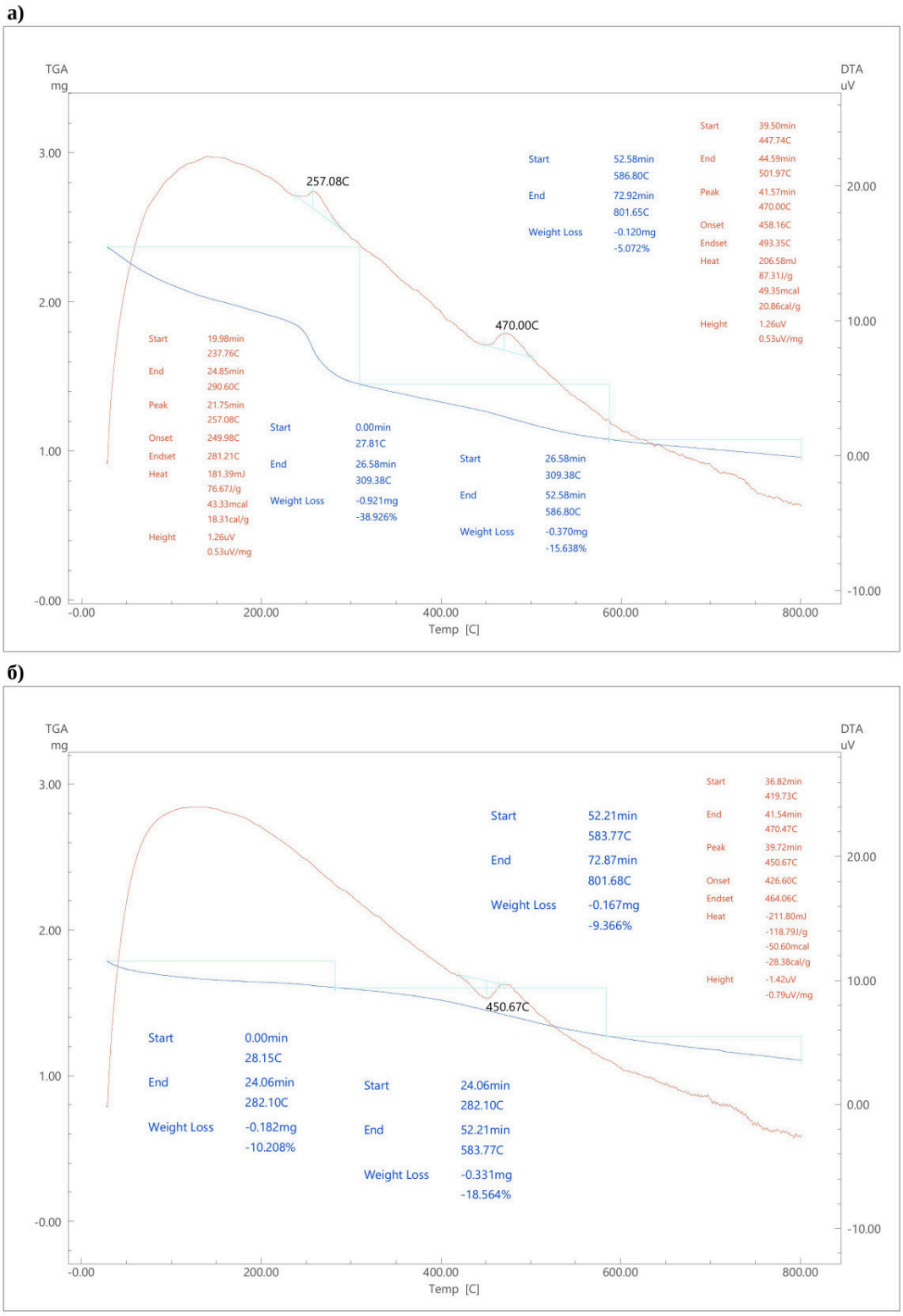


Рисунок 1. Кривые ТГА и ДТА покрытия АР-200: а – до огневого испытания; б – после огневого испытания

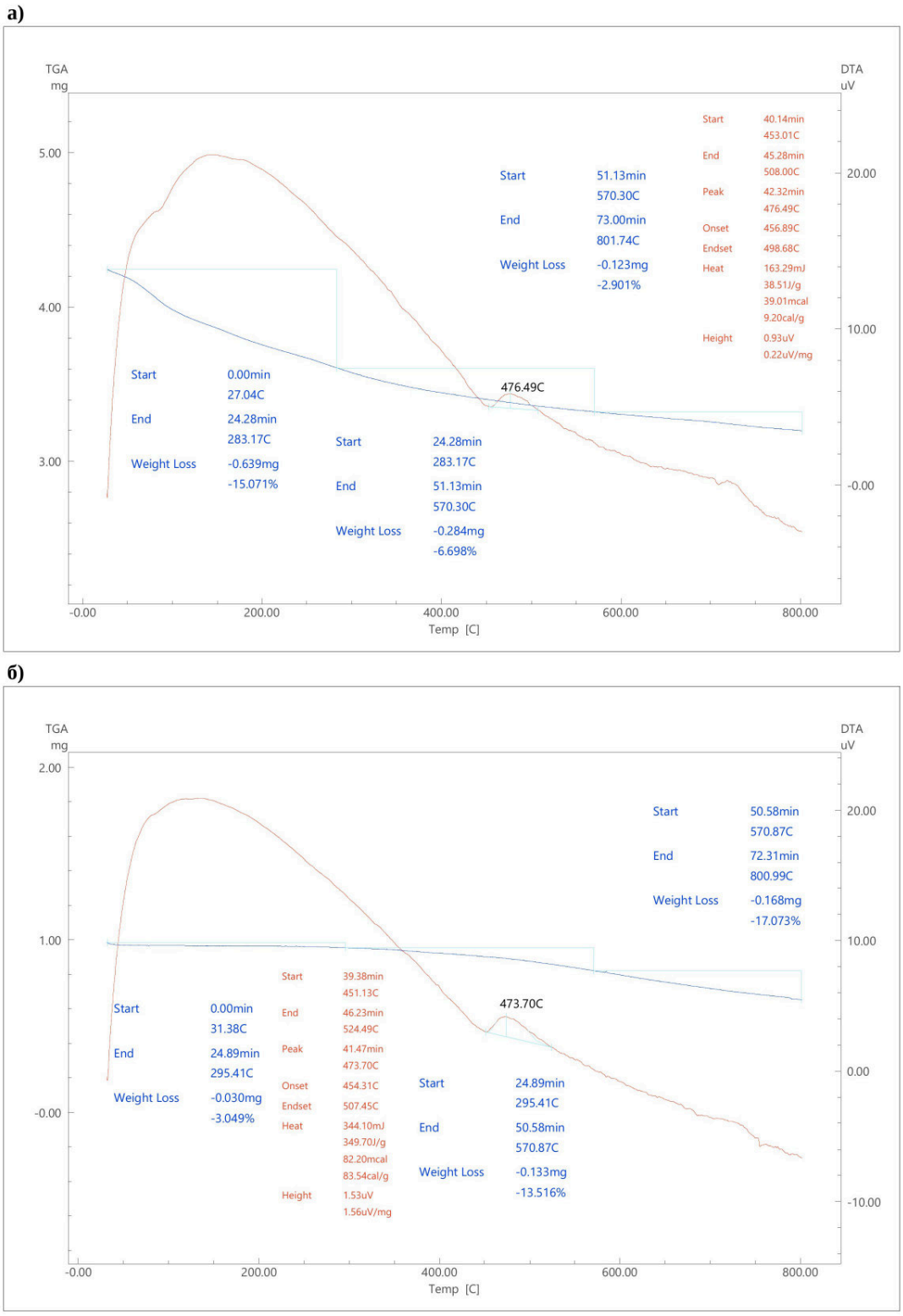


Рисунок 2. Кривые ТГА и ДТА покрытия АР-250: а – до огневого испытания; б – после огневого испытания

Таблица 1. Потери массы по стадиям и показатели термической стабильности покрытий

Образец	**Δm_I, %**	**Δm_{II}, %**	**Δm_{III}, %**	**Всего, %**	**Остаток при 800 °С, %**	**T_{20}, °С**
АР-200, до испытания	38,93	15,64	5,07	59,64	40,36	218
АР-200, после испытания	10,21	18,56	9,37	38,14	61,86	463

Образец	Δm_I, %	Δm_{II}, %	Δm_{III}, %	Всего, %	Остаток при 800 °C, %	T_{20}, °C
АР-250, до испытания	15,07	6,70	2,90	24,67	75,33	456
АР-250, после испытания	3,05	13,52	17,07	33,64	66,36	611

Таблица 2. Тепловые эффекты на кривых ДТА

Образец	$T_{нач}$, °C	$T_{макс}$, °C	$T_{кон}$, °C	Q, Дж/г	Эффект
АР-200, до испытания	250,0	257,1	281,2	+76,67	экзо
АР-200, до испытания	458,2	470,0	493,4	+87,31	экзо
АР-200, после испытания	426,6	450,7	464,1	−118,79	эндо
АР-250, до испытания	456,9	476,5	498,7	+38,51	экзо
АР-250, после испытания	454,3	473,7	507,5	+349,70	экзо

Высушенные покрытия. Покрытие АР-200 теряет до 800 °C 59,64 % массы, из них 38,93 % – на I стадии. До 150 °C масса плавно уменьшается на 14,8 % за счёт удаления свободной и слабосвязанной воды силикатного геля. В интервале 150–300 °C теряется ещё 23,1 %, а скорость потери массы достигает максимума 0,32 %/°C при 259 °C. В этой области накладываются разложение азотсодержащего компонента с выделением негорючих газов [10], дегидратация минерального наполнителя [4] и деструкция полимерной добавки. Первые два процесса эндотермичны, тогда как при 257,1 °C зафиксирован экзотермический эффект (+76,67 Дж/г). Следовательно, основной вклад в тепловой эффект, вероятнее всего, вносит термоокислительная деструкция полимерной добавки. Это подтверждается тем, что у покрытия АР-250, не содержащего такой добавки, нет ни ступени на кривой ТГА, ни пика ДТА в этой области. Второй экзотермический эффект при 470,0 °C (+87,31 Дж/г), вероятно, связан с окислением углеродистого остатка.

Покрытие АР-250 теряет 24,67 % массы, то есть в 2,4 раза меньше; остаток при 800 °C составляет 75,33 % против 40,36 % у АР-200. Разложение протекает без резкой ступени: выше 150 °C скорость потери массы не превышает 0,06 %/°C. Экзотермический эффект при 476,5 °C (+38,51 Дж/г) в 2,3 раза меньше, чем у АР-200, что указывает на меньшую долю горючей органической части. Более высокую стабильность АР-250 можно связать с борсодержащей добавкой: соединения бора действуют в конденсированной фазе и образуют стекловидную плёнку, замедляющую выход летучих продуктов [9]. Температура T_{20} равна 218 °C для АР-200 и 456 °C для АР-250 (рисунок 3).

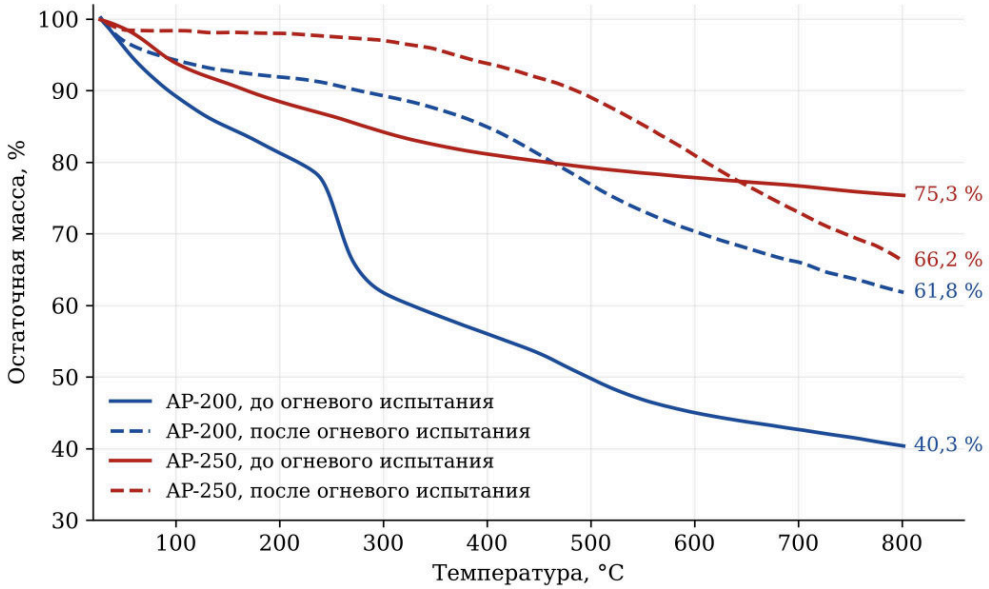


Рисунок 3. Кривые ТГА покрытий до и после огневого испытания, пересчитанные в проценты от исходной массы

Остаток после огневого испытания. После испытания у обоих покрытий резко сокращается низкотемпературная стадия. Потеря массы на I стадии уменьшилась у АР-200 с 38,93 до 10,21 % (в 3,8 раза), у АР-250 – с 15,07 до 3,05 % (в 4,9 раза). У АР-200 исчез максимум скорости при 259 °C, а T_{20} возросла с 218 до 463 °C; у АР-250 T_{20} увеличилась с 456 до 611 °C. Эти изменения прямо отражают защитное действие: водяной пар и негорючие газы, которые высушенное покрытие выделяет до 300 °C, расходуются под действием пламени, поглощая тепло и разбавляя горючие газы у поверхности [4, 8].

Основная потеря массы остатков смещается в область высоких температур: доля III стадии возросла у АР-200 с 5,07 до 9,37 %, у АР-250 – с 2,90 до 17,07 %. Это объясняется выгоранием углеродистого (коксового) остатка, образовавшегося при действии пламени. Рост экзотермического эффекта у АР-250 с +38,51 до +349,70 Дж/г подтверждает накопление углеродистой фазы. По этой же причине остаток при 800 °C у АР-250 после испытания ниже, чем до него (66,36 против 75,33 %), а у АР-200 выше (61,86 против 40,36 %): из АР-200 удалились летучие компоненты, и доля минеральной части увеличилась. В образце АР-200 после испытания прибор зафиксировал эндотермический эффект при 450,7 °C; его знак зависит от проведения базовой линии и требует уточнения повторным измерением.

Связь с огнезащитной эффективностью. Результаты термического анализа согласуются с огневыми испытаниями: состав АР-250, показавший наименьшую потерю массы по ГОСТ 16363-98 (7,9 %) [13], отличается и наибольшей термической стабильностью. Покрытие АР-200 действует преимущественно за счёт выделения газов и пара (38,93 % массы до 300 °C), что также обеспечивает I группу эффективности (8,5 %). Ограничения работы: каждый образец измерен однократно при малой массе навески, состав выделяющихся газов не определялся. Для подтверждения механизма необходимы повторные измерения, анализ газовой фазы и фазового состава остатка.

Заключение

1. Огнезащитные покрытия АР-200 и АР-250 на основе жидкого стекла разлагаются в интервале 27–800 °С в три стадии. Высушенное покрытие АР-200 теряет 59,64 % массы (остаток 40,36 %), покрытие АР-250 – 24,67 % (остаток 75,33 %), то есть в 2,4 раза меньше.

2. У АР-200 основная часть разложения (38,93 %) приходится на область до 310 °С с максимумом скорости при 259 °С и сопровождается экзотермическим эффектом. У АР-250 стадия резкого разложения отсутствует; температура потери 20 % массы составляет 456 °С против 218 °С у АР-200.

3. После огневого испытания потеря массы на низкотемпературной стадии уменьшилась в 3,8 раза у АР-200 и в 4,9 раза у АР-250. Газо- и парообразующие компоненты покрытий расходуются под действием пламени, а на поверхности остаётся термически устойчивый минерально-углеродный слой.

4. Более высокая термическая стабильность АР-250 согласуется с наименьшей потерей массы в огневом испытании (7,9 %). Этот состав рекомендуется как основной вариант для огнезащиты древесных материалов.

Список литературы

1. ГОСТ 16363-98. Средства огнезащитные для древесины. Методы определения огнезащитных свойств: межгос. стандарт, введ. 01.07.1999. – Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1998. – 11 с.
2. Качикова Д., Кубовский И., Эштокова А. Kačíková D., Kubovský I., Eštoková A. [et al.]. The influence of nanoparticles on fire retardancy of pedunculate oak wood // Nanomaterials. – 2021. – Т. 11, № 12. – Art. 3405. – DOI: 10.3390/nano11123405.
3. Albert C.M., Liew K.C. Recent development and challenges in enhancing fire performance on wood and wood-based composites: A 10-year review from 2012 to 2021 // Journal of Bioresources and Bioproducts. – 2024. – Т. 9, № 1. – P. 27–42. – DOI: 10.1016/j.jobab. 2023.10.004.
4. Hull T.R., Witkowski A., Hollingbery L. Fire retardant action of mineral fillers // Polymer Degradation and Stability. – 2011. – Т. 96, № 8. – P. 1462–1469. – DOI: 10.1016/ j.polymdegradstab.2011.05.006.
5. Kolya H., Kang C.-W. Eco-friendly polymer nanocomposite coatings for next-generation fire retardants for building materials // Polymers. – 2045. – Т. 16, № 14. – Art. 2045. – DOI: 10.3390/polym16142045.
6. Lee Y.X., Wang W., Lei Y. [et al.]. Flame-retardant coatings for wooden structures // Progress in Organic Coatings. – 2025. – Т. 198. – Art. 108903. – DOI: 10.1016/j.porgcoat.2024.108903.
7. Lowden L.A., Hull T.R. Flammability behaviour of wood and a review of the methods for its reduction // Fire Science Reviews. – 2013. – Т. 2. – DOI: 10.1186/2193-0414-2-4.
8. Nazrun T., Hassan M.K., Hasnat M.R. [et al.]. A comprehensive review on intumescent coatings: formulation, manufacturing methods, research development, and issues // Fire. – 2025. – Т. 8, № 4. – Art. 155. – DOI: 10.3390/fire8040155.

9. Popescu C.-M., Pfriem A. Treatments and modification to improve the reaction to fire of wood and wood based products – An overview // Fire and Materials. – 2020. – T. 44, № 1. – P. 100–111. – DOI: 10.1002/fam.2779.
10. Shao Y., Wang Y., Yang F. [et al.]. Sodium silicate/urea/melamine ternary synergistic waterborne acrylic acid flame-retardant coating and its flame-retardant mechanism // Molecules. – 2024. – T. 29, № 7. – Art. 1472. – DOI: 10.3390/molecules29071472.
11. Vyazovkin S., Chrissafis K., Di Lorenzo M.L. [et al.]. ICTAC Kinetics Committee recommendations for collecting experimental thermal analysis data for kinetic computations // Thermochimica Acta. – 2014. – T. 590. – P. 1–23. – DOI: 10.1016/j.tca.2014.05.036.
12. Wang Y., Ran Y., Shao Y. [et al.]. A novel intumescent MCA-modified sodium silicate/acrylic flame-retardant coating to improve the flame retardancy of wood // Molecules. – 2024. – T. 29, № 13. – Art. 3021. – DOI: 10.3390/molecules29133021.
13. Xoliqulov Sh. P., Nurqulov F.N. Yog‘och uchun polimer antipiren kompozitsiyalarini ishlab chiqish va ularning yong‘inga bardoshliligini baholash // Development of Science. – 2025. – T. 2, № 12. – P. 46–58.

References

1. GOST 16363-98. Sredstva ognezashchitnyye dlya drevesiny. Metody opredeleniya ognezashchitnykh svoystv [Fire retardants for wood. Methods for determination of fire-retardant properties]. Minsk, Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification, 1998. – Minsk: Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification, 1998. (In Russ.).
2. Kačíková D., Kubovský I., Eštoková A. et al. Kačíková D., Kubovský I., Eštoková A. et al. The influence of nanoparticles on fire retardancy of pedunculate oak wood. Nanomaterials, 2021, vol. 11, art. 3405 // Nanomaterials. – 2021. – Vol. 11, No. 12. – Art. 3405. – DOI: 10.3390/nano11123405.
3. Albert C.M., Liew K.C. Recent development and challenges in enhancing fire performance on wood and wood-based composites: A 10-year review from 2012 to 2021 // Journal of Bioresources and Bioproducts. – 2024. – No. 1. – P. 27–42. – DOI: 10.1016/j.jobab.2023.10.004.
4. Hull T.R., Witkowski A., Hollingbery L. Fire retardant action of mineral fillers. Polymer Degradation and Stability, 2011, vol. 96, no. 8, P. 1462–1469. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2011.05.006.
5. Kolya H., Kang C.-W. Eco-friendly polymer nanocomposite coatings for next-generation fire retardants for building materials. Polymers, 2024, vol. 16, no. 14, art. 2045. DOI: 10.3390/polym16142045.
6. Lee Y.X., Wang W., Lei Y. et al. Flame-retardant coatings for wooden structures. Progress in Organic Coatings, 2025, vol. 198, art. 108903. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2024.108903.
7. Lowden L.A., Hull T.R. Flammability behaviour of wood and a review of the methods for its reduction. Fire Science Reviews, 2013, vol. 2, art. 4. DOI: 10.1186/2193-0414-2-4.

8. Nazrun T., Hassan M.K., Hasnat M.R. et al. A comprehensive review on intumescent coatings: formulation, manufacturing methods, research development, and issues. Fire, 2025, vol. 8, no. 4, art. 155. DOI: 10.3390/fire8040155.
9. Popescu C.-M., Pfriem A. Treatments and modification to improve the reaction to fire of wood and wood based products – An overview. Fire and Materials, 2020, vol. 44, no. 1, P. 100–111. DOI: 10.1002/fam.2779.
10. Shao Y., Wang Y., Yang F. et al. Sodium silicate/urea/melamine ternary synergistic waterborne acrylic acid flame-retardant coating and its flame-retardant mechanism. Molecules, 2024, vol. 29, no. 7, art. 1472. DOI: 10.3390/molecules29071472.
11. Vyazovkin S., Chrissafis K., Di Lorenzo M.L. et al. ICTAC Kinetics Committee recommendations for collecting experimental thermal analysis data for kinetic computations. Thermochimica Acta, 2014, vol. 590, P. 1–23. DOI: 10.1016/j.tca.2014.05.036.
12. Wang Y., Ran Y., Shao Y. et al. A novel intumescent MCA-modified sodium silicate/acrylic flame-retardant coating to improve the flame retardancy of wood. Molecules, 2024, vol. 29, no. 13, art. 3021. DOI: 10.3390/molecules29133021.
13. Xoliqulov Sh.P., Nurqulov F.N. Yog‘och uchun polimer antipiren kompozitsiyalarini ishlab chiqish va ularning yong‘inga bardoshliligini baholash [Development of polymer fire-retardant compositions for wood and evaluation of their fire resistance]. Development of Science, 2025, vol. 2, no. 12, P. 46–58. (In Uzb.).

Статья поступила в редакцию: 21.10.2026
Статья принята к публикации: 27.10.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 628.3

Адсорбционно-коагуляционная комплексная очистка сточных вод нефте и газоперерабатывающих предприятий

Ширинов Гайратжон Кодиржонович
доц. кафедры
Химии и нефтегазовой технологии, Бухарский государственный университет
Республика Узбекистан, г. Бухара

Назаров Сайфулла Ибодуллоевич
д-р техн. наук (DSc)
проф., проф. кафедры Химии и нефтегазовой технологии, Бухарский государственный университет
Республика Узбекистан, г. Бухара
E-mail: s.i.nazarov@buxdu.uz

Adsorption–coagulation complex treatment of wastewater from oil and gas processing plants

Shirinov Gayratjon
Associate Professor of the Department of Chemistry and Oil and Gas Technology Bukhara State University
Uzbekistan, Bukhara

Nazarov Sayfulla
doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Chemistry and Oil and Gas Technology, Bukhara State University
Uzbekistan, Bukhara

Аннотация

Предприятия по переработке нефти и газа формируют значительные объёмы сточных вод сложного состава — с нефтепродуктами, фенолами, сульфидами, взвешенными веществами и ионами тяжёлых металлов, полное удаление которых традиционными механическими и биологическими методами затруднено. В работе рассмотрена комплексная адсорбционно-коагуляционная технология глубокой очистки таких стоков, объединяющая коагуляцию полиоксихлоридом алюминия, сорбцию на органо-неорганическом композиционном адсорбенте и фильтрацию. Сорбционное равновесие изучали в статическом режиме при начальных концентрациях нефтепродуктов 100–1600 мг/л, а экспериментальные изотермы обрабатывали по моделям Ленгмюра и Фрейндлиха. С ростом высоты фильтрующего слоя от 5 до 35 см остаточное содержание нефтепродуктов снижалось с 0,015

Библиографическое описание: Ширинов Г.К., Назаров С.И. Адсорбционно-коагуляционная комплексная очистка сточных вод нефте и газоперерабатывающих предприятий // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23641

до 0,0010 мг/дм^3, а степень очистки возрастала с 98,88 до 99,92 %. Линеаризация по Ленгмюру (R^2 = 0,9945) дала предельную ёмкость 7,06 мг/г и константу равновесия 0,35 л/мг, тогда как модель Фрейндлиха (n = 1,41) указала на благоприятную сорбцию на гетерогенной поверхности. Полная обработка обеспечила снижение содержания нефтепродуктов на 98,8–99,9 %, химического потребления кислорода — на 85–92 %, взвешенных веществ — на 97–99 %. Полученные результаты подтверждают высокую эффективность сочетания коагуляции, адсорбции и фильтрации при глубокой очистке сточных вод нефтегазовой отрасли.

Abstract

Oil and gas processing plants generate large volumes of chemically complex wastewater containing petroleum products, phenols, sulphides, suspended solids and heavy-metal ions, which conventional mechanical and biological treatment rarely removes completely. This paper examines a combined adsorption–coagulation technology for the deep purification of such effluents, integrating coagulation with polyaluminium chloride, sorption on an organo–inorganic composite adsorbent, and filtration. Adsorption equilibrium was studied in a static regime at initial petroleum-product concentrations of 100–1600 mg/L, and the experimental isotherms were fitted to the Langmuir and Freundlich models. As the filter-bed height increased from 5 to 35 cm, the residual petroleum-product content fell from 0.015 to 0.0010 mg/dm^3 and the removal efficiency rose from 98.88 to 99.92 %. Langmuir linearisation (R^2 = 0.9945) yielded a limiting capacity of 7.06 mg/g and an equilibrium constant of 0.35 L/mg, while the Freundlich model (n = 1.41) confirmed favourable sorption on a heterogeneous surface. The complete treatment reduced petroleum products by 98.8–99.9 %, chemical oxygen demand by 85–92 %, and suspended solids by 97–99 %. These results confirm the high efficiency of coupling coagulation, adsorption and filtration for the deep treatment of petroleum-industry wastewater.

Ключевые слова: нефтегазовая промышленность, сточные воды, адсорбция, коагуляция, органо-неорганический адсорбент, полиоксихлорид алюминия, фильтрация, нефтепродукты, ионы тяжёлых металлов, изотерма сорбции, комплексная технология очистки, экологическая безопасность.

Keywords: oil and gas industry, wastewater, adsorption, coagulation, organo–inorganic adsorbent, polyaluminum chloride, filtration, petroleum products, heavy metal ions, sorption isotherm, complex treatment technology, environmental safety.

Введение

Водные ресурсы всё чаще становятся лимитирующим фактором промышленного развития, и нагрузка на них с расширением производства неуклонно растёт. Нефте- и газоперерабатывающая отрасль занимает в экономике особое место, однако именно здесь образуются крупные потоки загрязнённых стоков: переработка одной тонны сырой нефти сопровождается образованием в среднем 3–5 м^3 сточных вод [1].

Такие воды несут нефтяные эмульсии, фенолы, ароматические углеводороды, сульфиды, аммиак и тяжёлые металлы, а их химическое потребление кислорода достигает высоких значений [1, 2]. Опасность этих компонентов не сводится к загрязнению водоёмов — фенолы и полиароматические углеводороды токсичны и нарушают работу биологических систем, угрожая как экосистемам, так и здоровью человека [2, 11].

Механическая и биологическая очистка, составляющая основу большинства действующих схем, при высокой концентрации и сложном составе загрязнителей далеко не всегда доводит воду до нормативного качества. Это подтолкнуло интерес к гибридным технологиям, где коагуляция, адсорбция и окислительные процессы дополняют друг друга [8, 5]. Связка коагуляции с адсорбцией оказалась особенно результативной: она позволяет одновременно извлекать растворённую органику, эмульгированные нефтепродукты и ионы тяжёлых металлов [4, 6, 3, 9].

На стадии коагуляции мелкодисперсные и коллоидные частицы укрупняются во флокулы и осаждаются, тогда как последующая сорбция удерживает растворённые вещества на развитой поверхности сорбента; активированные угли, минеральные и органо-неорганические композиты обеспечивают при этом высокую степень извлечения [7]. Цель настоящей работы — обосновать эффективность комплексной адсорбционно-коагуляционной очистки сточных вод нефте- и газоперерабатывающих предприятий и оценить её ключевые параметры на основе экспериментального изучения сорбционного равновесия и фильтрационных характеристик.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования служили сточные воды газоперерабатывающего предприятия с исходным содержанием нефтепродуктов около 150 мг/дм^3, загрязнённые также взвешенными веществами. Для очистки применяли композиционный адсорбент органо-неорганической природы с высокой сорбционной активностью, а в качестве коагулянтов — полиоксихлорид алюминия (PAC), сульфат алюминия и хлорид железа.

Сорбцию изучали в статическом режиме: навеску адсорбента массой 0,5 г вводили в 1,5 л раствора с начальной концентрацией нефтепродуктов от 100 до 1600 мг/л. После установления равновесия определяли остаточную концентрацию и рассчитывали величину адсорбции по уравнению:

$$A = (C_0 - C)\cdot V / m,$$

где A — величина адсорбции, мг/г; C_0 и C — начальная и равновесная концентрации, мг/л; V — объём раствора, л; m — масса адсорбента, г.

Влияние коагуляции оценивали при дозах реагентов 0,1–0,6 мг/л. После введения коагулянта смесь перемешивали 10–15 мин, затем отстаивали и фильтровали. Содержание взвешенных веществ находили гравиметрически, концентрацию нефтепродуктов — фотометрически, согласно действующим стандартам анализа воды.

Сорбционные свойства адсорбента описывали изотермами Ленгмюра и Фрейндлиха, параметры которых рассчитывали по линеаризованным формам соответствующих уравнений. Фильтрационные опыты вели в колонке с сорбентом, изменяя высоту слоя от 5 до 35 см при скорости фильтрации 3–5 м/ч и pH среды 6–7; эффективность оценивали по снижению концентраций нефтепродуктов и взвешенных веществ на выходе.

Результаты и обсуждение

Работу комбинированной схемы, включающей вермикулитово-песчаный фильтр и органо-неорганический коагулянт, оценивали прежде всего по влиянию высоты фильтрующего слоя на остаточное содержание нефтепродуктов (табл. 1).

Таблица 1. Эффективность очистки в зависимости от высоты фильтрующего слоя

Высота слоя, см	Концентрация нефтепродуктов на выходе, мг/дм^3	Эффективность очистки, %
5	0,015	98,88
10	0,0085	99,37
15	0,0055	99,60
20	0,0023	99,82
25	0,0020	99,85
30	0,0016	99,88
35	0,0010	99,92

Уже при слое 5 см концентрация нефтепродуктов на выходе не превышала 0,015 мг/дм^3, что отвечает степени очистки 98,88 %. Наращивание слоя до 10–20 см повышало эффективность до 99,37–99,82 %, а при 25–35 см остаточное содержание опускалось до 0,0010–0,0020 мг/дм^3 при степени очистки 99,85–99,92 %. Более толстый слой удлиняет путь контакта воды с сорбентом и усиливает как сорбцию, так и механическое задержание примесей.

Ёмкость самого адсорбента исследовали при постоянной навеске 0,5 г и объёме раствора 1,5 л, варьируя начальную концентрацию нефтепродуктов C_0 (табл. 2).

Таблица 2. Показатели адсорбции нефтепродуктов на органо-неорганическом адсорбенте

№	m адсорбента, г	V, л	C_0, мг/л	C, мг/л	A, мг/г
1	0,5	1,5	100	0,16	299,52
2	0,5	1,5	200	0,31	599,07
3	0,5	1,5	300	0,49	898,53
4	0,5	1,5	400	0,66	1198,02
5	0,5	1,5	500	0,88	1497,36
6	0,5	1,5	600	1,15	1796,55
7	0,5	1,5	800	1,52	2395,44
8	0,5	1,5	1000	2,34	2992,98
9	0,5	1,5	1200	3,18	3590,46
10	0,5	1,5	1400	4,41	4186,77
11	0,5	1,5	1600	6,02	4781,94

С увеличением равновесной концентрации величина адсорбции закономерно возрастала: от 299,52 мг/г при C_0 = 100 мг/л до 4781,94 мг/г при C_0 = 1600 мг/л. Построенная в координатах A–C изотерма имеет выпуклую, близкую к S-образной форму: крутой начальный подъём при малых концентрациях сменяется постепенным выходом на плато, что указывает на поэтапное заполнение активных центров поверхности молекулами нефтепродуктов.

Для количественного описания процесса данные обрабатывали по модели Ленгмюра в линейной форме:

$$C/A = (1/A_{\infty})\cdot C + 1/(A_{\infty}\cdot K).$$

Линеаризация в координатах C/A–C оказалась высоко достоверной (R^2 = 0,9945; рис. 1) и дала предельную адсорбционную ёмкость A_{∞} = 7,06 мг/г и константу равновесия K = 0,35 л/мг. Такое соответствие свидетельствует о преимущественно мономолекулярном характере связывания нефтепродуктов на поверхности адсорбента.

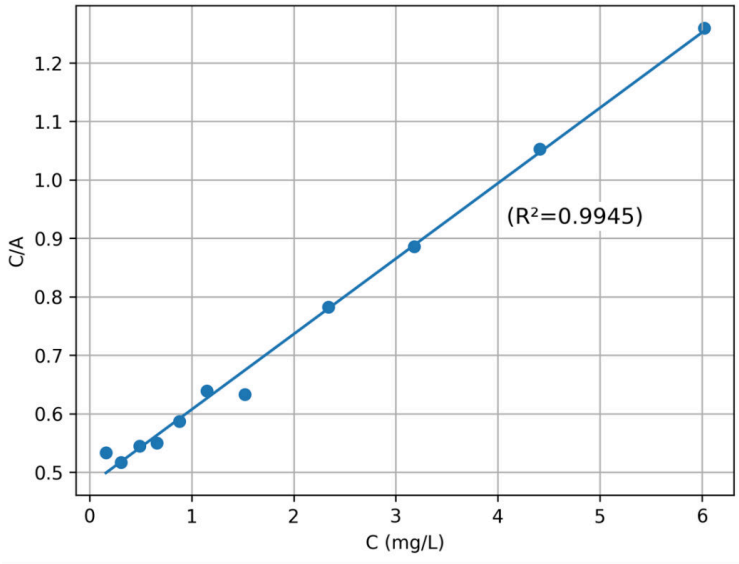


Рисунок 1. Линеаризация изотермы адсорбции нефтепродуктов в координатах уравнения Ленгмюра (график C/A–C)

Дополнительно применили модель Фрейндлиха (рис. 2), для которой получены коэффициенты K_f = 1,64 и n = 1,41. Значение n > 1 отвечает благоприятному протеканию сорбции, а удовлетворительное описание данных уравнением Фрейндлиха (R^2 = 0,9802) подтверждает энергетическую неоднородность поверхности. Совместное выполнение обеих моделей отражает сложный механизм, в котором мономолекулярное связывание сочетается с распределением по разнородным центрам.

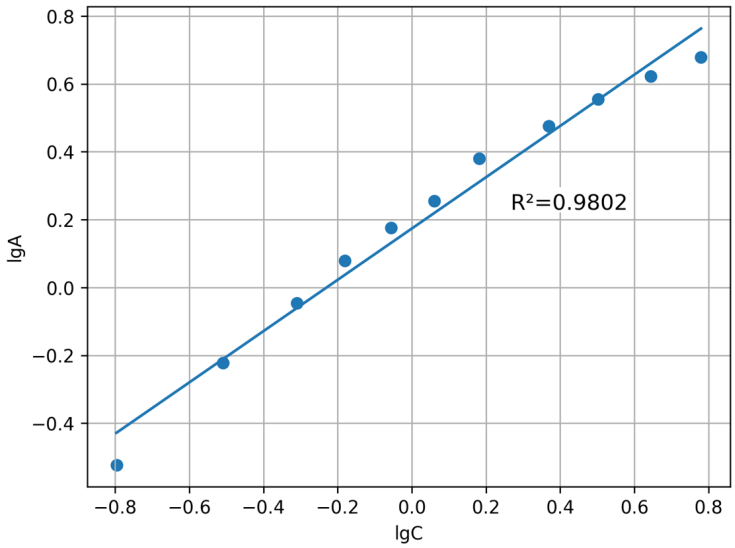


Рисунок 2. Линеаризация изотермы адсорбции нефтепродуктов в координатах уравнения Фрейндлиха (график lgA–lgC)

Эффективность всей технологической цепочки — органо-неорганический коагулянт, сорбция и фильтрация — проверяли в лабораторных и полупромышленных условиях. Последовательное прохождение стадий обеспечивало комплексное снижение содержания нефтепродуктов, органических соединений, взвесей и ионов металлов (табл. 3).

Таблица 3. Поэтапная эффективность комплексной системы очистки

Показатель	**Исходная концентрация, мг/дм^3**	**После комплексной очистки, мг/дм^3**	**Общая эффективность, %**
Нефтепродукты	1,35	0,001–0,015	98,8–99,9
ХПК (COD)	120–180	10–20	85–92
Мутность	100 %	< 5 %	95–98
Взвешенные вещества	100 %	< 3 %	97–99
Общее содержание железа (Fe)	0,5–1,0	0,05	90–95

Примечание: исходная концентрация нефтепродуктов 150 мг/дм^3; скорость фильтрации 3–5 м/ч; высота слоя 20–35 см; pH 6–7.

Данные табл. 3 показывают глубокую очистку по всем ключевым показателям. Содержание нефтепродуктов снизилось с 1,35 до 0,001–0,015 мг/дм^3 (98,8–99,9 %), химическое потребление кислорода — со 120–180 до 10–20 мг/дм^3 (85–92 %). Мутность и взвешенные вещества сократились на 95–98 % и 97–99 % соответственно, а концентрация общего железа упала с 0,5–1,0 до 0,05 мг/дм^3, что говорит о результативном удалении ионов металлов. В совокупности это подтверждает, что связка коагуляции, адсорбции и фильтрации доводит стоки нефтегазовой отрасли до высокого качества.

Заключение

Проведённое исследование показало, что комплексная адсорбционно-коагуляционная схема эффективно решает задачу глубокой очистки сточных вод нефте- и газоперерабатывающих предприятий. Увеличение высоты фильтрующего слоя с 5 до 35 см

повышало степень удаления нефтепродуктов с 98,88 до 99,92 %, а обработка изотерм подтвердила преимущественно мономолекулярный характер сорбции на органо-неорганическом адсорбенте с предельной ёмкостью 7,06 мг/г (модель Ленгмюра, $R^2 = 0,9945$) при сохранении признаков поверхностной неоднородности (модель Фрейндлиха, n = 1,41).

Полная технологическая цепочка обеспечила снижение содержания нефтепродуктов на 98,8–99,9 %, химического потребления кислорода — на 85–92 %, взвешенных веществ — на 97–99 % и общего железа — на 90–95 %. Сочетание доступных реагентов, простоты аппаратурного оформления и высокой глубины очистки делает предложенную технологию перспективной для практического внедрения на объектах отрасли; дальнейшие работы целесообразно направить на оптимизацию доз коагулянтов и регенерацию сорбента.

Список литературы

1. Раззаков Х.К., Амонов М.Р., Назаров С.И. Раззақов Ҳ.Қ., Амонов М.Р., Назаров С.И. Получение сорбентов на основе механической активации сапропелевого сырья [Электронный ресурс] // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. – 2026. – № 6 (147). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/22965 (дата обращения: 20.10.2026).
2. Alatabe M.J.A., Ghorbanpour M., Farzi A. Adsorption and advanced oxidation processes for sustainable treatment of oil produced water and organic wastewater: a review // Russian Journal of Applied Chemistry. – 2024. – T. 97. – P. 751–771. – DOI: 10.1134/S1070427224100045.
3. Ayhan N.N., Aldemir A. Özgüven A. Treatment of petroleum refinery wastewater by chemical coagulation method: determination of optimum removal conditions using experimental design // Brazilian Journal of Chemical Engineering. – 2024. – T. 41. – P. 121–137. – DOI: 10.1007/s43153-023-00358-3.
4. El Houda M.N., Chabani M., Bouafia-Chergui S., Touil A. Removal of chemical oxygen demand from real petroleum refinery wastewater through a hybrid approach: electrocoagulation and adsorption // Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. – 2024. – T. 196. – Art. 109680. – DOI: 10.1016/j.cep.2024.109680.
5. Hartal O., Madinzi A., Rifi S.K., Haddaji C., Kurniawan T.A., Anouzla A., Souabi S. Optimization of coagulation–flocculation process for wastewater treatment from vegetable oil refineries using chitosan as a natural flocculant // Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management. – 2024. – Art. 100957. – DOI: 10.1016/j.enmm.2024.100957.
6. Jiad M.M., Abbar A.H. Petroleum refinery wastewater treatment using a novel combined electro-Fenton and photocatalytic process // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. – 2023. – T. 125. – P. 1–14. – DOI: 10.1016/j.jiec.2023.09.018.
7. Medeiros D.C.C.S., Usman M., Chelme-Ayala P., Saeed S., Al-Shaikh I., Bekele A., El-Din M.G. Assessment of the potential of oily sludge char for removing organics from petroleum refinery wastewater // Waste Management Bulletin. – 2025. – T. 3, № 1. – P. 17–26.

8. Moneer A.A., Thabet W.M., Khedawy M., El-Sadaawy M.M., Shaaban N.A. Electrocoagulation process for oily wastewater treatment and optimization using response surface methodology // International Journal of Environmental Science and Technology. – 2023. – T. 20. – P. 13859–13872. – DOI: 10.1007/s13762-023-05003-7.
9. Odoom J., Iorhemen O.T., Li J. Advances in adsorption for oily wastewater treatment: eco-friendly adsorbents and analytical insights // Energy, Ecology and Environment. – 2025. – T. 10. – P. 15–44. – DOI: 10.1007/s40974-024-00332-w.
10. Razzakov X.K., Amonov M. R, Nazarov S.I, Sharipov M.S. A Density Functional Theory Study of Na-PAC/PATS-Modified Shofirkon Bentonite as a Composite Sorbent for Heavy-metal Cations and Organic Pollutants. Chemical Science International Journal. – 2026. – T. 35, № 4. – P. 196–211. – DOI: 10.9734/CSJI/2026/v35i41051.
11. Sadek N.J., Alardhi S.M., Albayati T.M., Salih I.K., Fard N.E. Recent developments in petroleum wastewater treatment based on advanced oxidation processes: a review // Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering. – 2025. – T. 44, № 4.

References

1. Razzakov Kh.K., Amonov M.R., Nazarov S.I. Preparation of sorbents based on mechanical activation of sapropel raw materials [Электронный ресурс]. // Universum: Technical Sciences: Electronic Scientific Journal. – 2026. – URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/22965 (accessed: 20.10.2026).
2. Alatabe M.J.A., Ghorbanpour M., Farzi A. Adsorption and advanced oxidation processes for sustainable treatment of oil produced water and organic wastewater: a review // Russian Journal of Applied Chemistry. – 2024. – Vol. 97. – P. 751–771. – DOI: 10.1134/S1070427224100045.
3. Ayhan N.N., Aldemir A. Özgüven A. Treatment of petroleum refinery wastewater by chemical coagulation method: determination of optimum removal conditions using experimental design // Brazilian Journal of Chemical Engineering. – 2024. – Vol. 41. – P. 121–137. – DOI: 10.1007/s43153-023-00358-3.
4. El Houda M.N., Chabani M., Bouafia-Chergui S., Touil A. Removal of chemical oxygen demand from real petroleum refinery wastewater through a hybrid approach: electrocoagulation and adsorption // Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. – 2024. – Vol. 196. – Art. 109680. – DOI: 10.1016/j.cep.2024.109680.
5. Hartal O., Madinzi A., Rifi S.K., Haddaji C., Kurniawan T.A., Anouzla A., Souabi S. Optimization of coagulation–flocculation process for wastewater treatment from vegetable oil refineries using chitosan as a natural flocculant // Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management. – 2024. – Art. 100957. – DOI: 10.1016/j.enmm.2024.100957.
6. Jiad M.M., Abbar A.H. Petroleum refinery wastewater treatment using a novel combined electro-Fenton and photocatalytic process // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. – 2023. – Vol. 125. – P. 1–14. – DOI: 10.1016/j.jiec.2023.09.018.
7. Medeiros D.C.C.S., Usman M., Chelme-Ayala P., Saeed S., Al-Shaikh I., Bekele A., El-Din M.G. Assessment of the potential of oily sludge char for removing organics from petroleum refinery wastewater // Waste Management Bulletin. – 2025. – Vol. 3, No. 1. – P. 17–26.

8. Moneer A.A., Thabet W.M., Khedawy M., El-Sadaawy M.M., Shaaban N.A. Electrocoagulation process for oily wastewater treatment and optimization using response surface methodology // International Journal of Environmental Science and Technology. – 2023. – Vol. 20. – P. 13859–13872. – DOI: 10.1007/s13762-023-05003-7.
9. Odoom J., Iorhemen O.T., Li J. Advances in adsorption for oily wastewater treatment: eco-friendly adsorbents and analytical insights // Energy, Ecology and Environment. – 2025. – Vol. 10. – P. 15–44. – DOI: 10.1007/s40974-024-00332-w.
10. Razzakov X.K., Amonov M. R, Nazarov S.I, Sharipov M.S. A Density Functional Theory Study of Na-PAC/PATS-Modified Shofirkon Bentonite as a Composite Sorbent for Heavy-metal Cations and Organic Pollutants. Chemical Science International Journal. – 2026. – Vol. 35, No. 4. – P. 196–211. – DOI: 10.9734/CSJI/2026/v35i41051.
11. Sadek N.J., Alardhi S.M., Albayati T.M., Salih I.K., Fard N.E. Recent developments in petroleum wastewater treatment based on advanced oxidation processes: a review // Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering. – 2025. – Vol. 44, No. 4.

Статья поступила в редакцию: 12.11.2026
Статья принята к публикации: 19.11.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 66.02+661.185+620.193

DOI: 10.32743/UniTech.2026.152.11.23779

Разработка технологии получения комплексных составов для очистки минеральных солевых отложений с использованием местного сырья

Эшонкулов Нурбек Кахрамон угли
базовый докторант
Ташкентский химико-технологический институт
Республика Узбекистан, г. Ташкент
ORCID:https://orcid.org/0009-0009-3142-7852
E-mail: nurik1995.nurbek@gmail.com
Абсалямова Гульноза Маматкуловна
доц. кафедры
Химическая технология переработки нефти и газа Ташкентский химико-технологический институт
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: absalyamovagulnoza@gmail.com
Жураев Шохрух
базовый докторант
Ташкентский химико-технологический институт
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: 0065shj@gmail.com
Мураталиева Насиба Хайдаровна
базовый докторант
Ташкентский химико-технологический институт
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Development of a technology for producing composite formulations for removing mineral salt deposits using local raw materials

Eshonqulov Nurbek Qaxramon o‘g‘li
PhD student (basic doctoral student)
Tashkent Chemical-Technological Institute
Uzbekistan, Tashkent
Absalyamova Gulnoza Mamatkulovna
Associate Professor of the Department of Chemical Technology of Oil and Gas Processing Tashkent Institute of Chemical Technology
Uzbekistan, Tashkent

Библиографическое описание: Разработка технологии получения комплексных составов для очистки минеральных солевых отложений с использованием местного сырья // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Эшонкулов Н.К.У. [и др.]. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23779

Juraev Shokhruh
PhD student (basic doctoral student)
Tashkent Chemical-Technological Institute Tashkent
Uzbekistan, Tashkent
Murataliyeva Nasiba Khaydarovna
PhD student (basic doctoral student)
Tashkent Chemical-Technological Institute Tashkent
Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

Цель работы — обосновать технологический подход к получению и применению комплексных составов для удаления минеральных солевых отложений с использованием компонентов, производимых или доступных на рынке Республики Узбекистан. Проведён сравнительный анализ научных публикаций 2005–2025 гг., рассмотрены механизмы удаления карбонатных, сульфатных и хлоридных отложений, а также выполнен стехиометрический расчёт расхода кислот для растворения карбоната кальция. Установлено, что универсального кислотного состава для удаления всех видов минеральных отложений не существует: карбонатные отложения целесообразно удалять контролируемым кислотным растворением, сульфаты кальция и бария требуют применения комплексообразующих или конверсионных систем, а хлоридные соли удаляются водной промывкой. Согласно опубликованным данным, смесь сульфаминовой, лимонной и уксусной кислот обеспечивала удаление до 65,79 % карбонатного осадка при температуре 50 °C, тогда как 5 %-ный раствор соляной кислоты обеспечивал 63,49 %. Для гипсовых отложений эффективность удаления более 80 % была показана при использовании MGDA в условиях 100 °C и pH около 10. Предложена пятистадийная модульная схема очистки, предусматривающая идентификацию состава отложений, обезжиривание, селективную обработку, промывку и нейтрализацию. Рассмотрена возможность использования отечественных SLES и кальцинированной соды. Теоретический расход составляет 1,94 кг сульфаминовой кислоты или 1,28 кг безводной лимонной кислоты на 1 кг $CaCO_3$. Работа имеет обзорно-расчётный характер; собственные экспериментальные результаты не заявляются, а предложенная программа лабораторных испытаний предназначена для последующей проверки эффективности, коррозионного воздействия и образования вторичных осадков.

Abstract

This study substantiates an approach to producing and applying composite formulations for removing mineral salt deposits using components manufactured in or available in Uzbekistan. A comparative review of publications from 2005–2025 was conducted. The mechanisms for removing carbonate, sulfate and chloride deposits were examined, and the stoichiometric acid demand for calcium carbonate dissolution was calculated. The analysis shows that no universal acidic formulation can remove all types of mineral deposits. Carbonate scales require controlled acid dissolution, calcium and barium sulfates require chelating or conversion systems, while chloride deposits can be removed by water washing. Published studies report up to 65.79 % removal of carbonate deposits using a sulfamic–citric–acetic acid mixture at 50 °C, compared with 63.49 % using 5 % hydrochloric acid in that study. For gypsum, removal exceeding 80 % was reported with

MGDA at 100 °C and approximately pH 10. A five-stage modular cleaning process is proposed, comprising deposit identification, degreasing, selective treatment, washing, and neutralization . The potential roles of locally produced SLES and soda ash are considered. The theoretical demand is 1.94 kg of sulfamic acid or 1.28 kg of anhydrous citric acid per kilogram of $CaCO_3$. The study is analytical and calculation-based and does not claim new experimental results. A laboratory testing programme is outlined to evaluate removal efficiency, corrosion, reagent compatibility and secondary precipitate formation. The proposed approach provides a basis for developing locally adapted cleaning formulations, subject to experimental validation and confirmation of reagent quality and origin.

Ключевые слова: минеральные отложения, солевые отложения, комплексный очиститель, местное сырьё, сульфаминовая кислота, комплексообразователь, коррозия.

Keywords: mineral scale, salt deposits, composite cleaner, local raw materials, sulfamic acid, chelating agent, corrosion.

Введение

Минеральные солевые отложения (scale) снижают надёжность и энергоэффективность оборудования: сужают сечение трубопроводов, повышают гидравлическое сопротивление, ухудшают теплопередачу и увеличивают эксплуатационные затраты. Особенно остро проблема стоит на нефтегазовых объектах [1, 2]. Чаще всего встречаются карбонаты кальция и магния, сульфаты кальция и бария, хлориды и их смеси; выбор реагента без идентификации фазового состава приводит к низкой эффективности или вторичным осадкам [1]. Кислоты эффективно растворяют карбонаты, но вызывают коррозию и газовыделение [2]; для гипса необходимы комплексообразователи, а для барита ($BaSO_4$) — специальные хелатирующие и диспергирующие системы [8–10].

Для Узбекистана задача актуальна при условии использования отечественных продуктов. Национальная отчётность подтверждает выпуск кальцинированной соды на местных хлориде натрия и известняке и производство серной кислоты [13]; на рынке представлен отечественный лауретсульфат натрия (SLES) компании BEHDASH CHEMICAL CO [11]. Наличие реагента у местного поставщика не гарантирует его отечественного происхождения, поэтому нужны паспорт качества и сертификат страны происхождения.

Цель работы — разработать аналитически обоснованную модульную схему получения и применения составов для очистки от минеральных отложений на основе подтверждённо локальных и локально доступных компонентов. Задачи: классифицировать отложения; сопоставить опубликованные данные по реагентам; определить роль местных продуктов; рассчитать расход кислот; составить программу лабораторной проверки. Собственные экспериментальные данные в статье не приводятся.

Материалы и методы исследования

Исследование носит обзорно-аналитический и расчётный характер. Использованы рецензируемые публикации 2005–2025 гг. по растворению карбонатных и сульфатных отложений, удалению $BaSO_4$ и ингибированию $CaCO_3$, а также официальные и коммерческие

сведения о продукции Узбекистана [1–14]. Литературные показатели получены на конкретных образцах и служат лишь ориентиром для планирования эксперимента. Классификация построена по доминирующей фазе: карбонатные ($CaCO_3$, $MgCO_3$), сульфатные ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$, $CaSO_4$; $BaSO_4$) и хлоридные (NaCl, KCl, $MgCl_2$); смешанные осадки обрабатываются последовательно. Состав осадка определяют методами XRD и XRF, переход катионов в раствор — ICP-OES. Подтверждёнными местными компонентами считаются SLES, кальцинированная сода и вода; сульфаминовая и лимонная кислоты и хелаты — базовые реагенты, происхождение которых подтверждается паспортами качества.

Результаты и обсуждение

1. Классификация отложений и механизмы очистки

Карбонаты удаляются гетерогенной реакцией с кислотой (1):

$$CaCO_3 + 2H^+ \rightarrow Ca^{2+} + CO_2\uparrow + H_2O. \quad (1)$$

Гипс ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) плохо растворяется в минеральных и слабых органических кислотах, но существенно лучше — при связывании Ca^{2+} сильными хелатами в щелочной или нейтральной среде. Барит имеет крайне низкое произведение растворимости и требует специализированных хелатирующих и диспергирующих композиций [8–10]. Хлориды хорошо растворимы и удаляются водной промывкой. Растворение одной фазы может изменить pH и вызвать вторичное осаждение другой, поэтому диагностика обязательна (табл. 1).

Таблица 1. Классификация минеральных отложений и выбор механизма удаления

Тип отложения	Соединения	Предпочтительный механизм	Основное ограничение
Карбонатное	$CaCO_3$, $MgCO_3$	Контролируемое кислотное растворение	Выделение CO_2, коррозия, малорастворимые соли
Сульфатное кальциевое	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$, $CaSO_4$	Комплексообразование с Ca^{2+} или конверсия в $CaCO_3$	Подкисление неэффективно
Сульфатное бариевое	$BaSO_4$	Хелатирующая и диспергирующая система	Крайне низкая растворимость; токсичные отходы
Хлоридное	NaCl, KCl, $MgCl_2$	Водная промывка	Контроль солесодержания и хлоридной коррозии
Смешанное	Карбонаты, сульфаты, хлориды	Последовательная обработка по данным XRD/XRF	Несовместимость реагентов, вторичные осадки

2. Опубликованные лабораторные данные

Wulandari и соавт. [14] изучали смеси сульфаминовой, лимонной и уксусной кислот (массовые соотношения 9:3:3, 6:6:3, 3:9:3) при 35, 45 и 50 °C. Максимум — 65,79 % для состава 9:3:3 при 50 °C; контрольный 5 %-ный HCl в тех же условиях дал 63,49 %. Разница составляет лишь 2,3 процентного пункта, поэтому результат следует считать сопоставимым с HCl, а не превосходящим его; возможное преимущество смеси (меньшая летучесть, удобство обращения) требует подтверждения.

Hou и соавт. [8] показали ряд эффективности растворения гипса MGDA > GLDA > DTPA > HEDP; 16 %-ный MGDA при pH ≈ 10 и 100 °C растворял более 80 % (т: ж = 2 г / 10 мл), что требует закрытого контура и оценки стойкости материалов. Альтернативой служит конверсия: в работе [3] гипс переводили в $CaCO_3$ карбонатом калия (до 96 % в мягких условиях), а карбоксиметилцеллюлоза удерживала частицы во взвеси. Отечественная кальцинированная сода может быть проверена как конверсионный агент по аналогии, но данных для Na_2CO_3 в [3] нет; образующийся $CaCO_3$ затем удаляется кислотным модулем. Для барита Luo и соавт. [9] предложили состав SA-20 (DTPA и полиакрилат натрия), действующий за счёт хелатирования Ba^{2+} и диспергирования. Удаляющие реагенты следует отличать от ингибиторов (фосфонаты, полимеры, малые добавки лимонной кислоты), которые замедляют рост кристаллов $CaCO_3$, но не растворяют сформированный слой [5–7, 12].

3. Местные компоненты и модульная схема

Подтверждённо отечественными являются кальцинированная сода (Кунградский содовый завод, метод Сольве на местных NaCl и известняке) [13] и SLES [11]. Сода не растворяет накипь: её роль — дозированная нейтрализация отработанных кислых растворов при перемешивании, вентиляции и контроле pH. SLES применяют на отдельной стадии обезжиривания; его устойчивость в кислой среде, пенообразование и влияние на хелатирование необходимо проверить, поэтому смешивать его с кислотным модулем без испытаний нельзя. Серная кислота (расход 0,98 кг/кг $CaCO_3$), несмотря на местное производство, непригодна для карбонатов: образуется малорастворимый $CaSO_4$, пассивирующий поверхность и дающий вторичный осадок. Происхождение сульфаминовой и лимонной кислот, MGDA/GLDA и DTPA в источниках [11, 13] не подтверждено, поэтому они считаются импортируемыми до получения документов; это определяет направление локализации.

Схема (табл. 2) построена по принципу «от простого к сложному»: сначала удаляются масляная плёнка и водорастворимые соли, затем выполняется селективная обработка; между модулями обязательна промывка. Порядок модулей для смешанных осадков определяется по XRD и уточняется опытом; при конверсионном подходе сульфатный модуль предшествует карбонатному.

Таблица 2. Модульная технологическая схема очистки минеральных солевых отложений

Стадия	Реагенты и операции	Контролируемые показатели
1. Идентификация осадка	Отбор пробы; XRD, XRF, ICP-OES	Фазовый состав, доли карбонатов, сульфатов, хлоридов
2. Обезжиривание	Водный раствор отечественного SLES; ополаскивание	Смачиваемость, пенообразование, остаточные нефтепродукты
3А. Карбонатный модуль	Сульфаминовая, лимонная и уксусная кислоты с ингибитором коррозии (в [14] испытания до 50 °C)	pH, масса осадка, Ca^{2+}/Mg^{2+}, скорость коррозии
3Б. Сульфатный модуль	Щелочной хелат MGDA/GLDA (гипс); DTPA с диспергатором (барит); конверсия карбонатом (гипс, проверить)	Ca^{2+}/Ba^{2+} в растворе, XRD остатка, вторичные осадки

Стадия	Реагенты и операции	Контролируемые показатели
3B. Хлоридный модуль	Циркуляционная промывка подготовленной водой	Электропроводность, Cl^-
4. Промывка	Вода до нейтральной реакции	pH, электропроводность
5. Нейтрализация и утилизация	Дозированная нейтрализация Na_2CO_3; осаждение и фильтрация примесей	pH, металлы, Ba^{2+}, взвеси, азот сульфаматов

4. Стехиометрический расчёт для карбонатного осадка

Рассчитан теоретический расход кислот на 1 кг чистого $CaCO_3$ (M = 100,09 г/моль) без учёта пористости, примесей и избытка кислоты. Сульфаминовая кислота (M = 97,09 г/моль) образует растворимый сульфамат кальция (2); теоретический расход составляет (2 × 97,09) / 100,09 = 1,94 кг/кг:

$$CaCO_3 + 2NH_2SO_3H \rightarrow Ca(NH_2SO_3)_2 + CO_2\uparrow + H_2O. \quad (2)$$

Для безводной лимонной кислоты (M = 192,12 г/моль) при использовании трёх карбоксильных групп (3):

$$3CaCO_3 + 2C_6H_8O_7 \rightarrow Ca_3(C_6H_5O_7)_2 + 3CO_2\uparrow + 3H_2O, \quad (3)$$

расход составляет (2 × 192,12) / (3 × 100,09) = 1,28 кг/кг. Цитрат кальция малорастворим, поэтому возможно его выпадение; рабочие концентрации проверяют опытом. Для осадка с массовой долей карбоната ω и массой $m_{ос}$ расход кислоты оценивается по (4):

$$m_к = k \cdot q \cdot \omega \cdot m_{ос}, \quad (4)$$

где q — удельный расход (1,94 кг/кг для сульфаминовой и 1,28 кг/кг для лимонной кислоты), k — коэффициент избытка, определяемый экспериментально. Например, при k = 1 на 100 кг $CaCO_3$ требуется 194 кг сульфаминовой кислоты (около 1,9 т 10 %-ного раствора) и выделяется около 24 м³ CO_2 (25 °C, 101,3 кПа).

5. Программа лабораторной проверки

Образцы отбирают с реального оборудования, сушат при 105 °C до постоянной массы и анализируют (XRD, XRF); допускается скрининг на модельных осадках с подтверждением на реальных. Опыты проводят не менее чем в трёх повторностях, варьируя тип и концентрацию реагента, температуру (25–50 °C для кислотного модуля, до 80 °C для хелатного), время контакта и отношение массы осадка к объёму раствора. Серии: вода (контроль); сульфаминовая и лимонная кислоты по отдельности; их смесь с уксусной по [14] в сравнении с 5 %-ным HCl; щелочной MGDA/GLDA; конверсия гипса раствором Na_2CO_3 с последующим кислотным растворением; DTPA с диспергатором; раствор SLES. Степень удаления отложения (5):

$$\eta = [(m_0 - m_1) / m_0] \times 100\ \%, \quad (5)$$

где m_0 — масса сухого осадка, г; m_1 — масса остатка после фильтрования, промывки и сушки, г. Коррозию оценивают гравиметрически на образцах-свидетелях из материалов оборудования по ASTM G31 – 21(2025) [4]; скорость коррозии (6):

$$CR = 87{,}6 \cdot \Delta m / (\rho \cdot A \cdot t), \quad (6)$$

где CR — мм/год; Δm — потеря массы, мг; ρ — плотность металла, г/см³; A — площадь образца, см²; t — время, ч. Рецептура оптимальна при высокой степени удаления целевой фазы, допустимой скорости коррозии (предел задаётся нормативами или регламентом предприятия), отсутствии вторичных осадков и минимальном расходе реагентов.

6. Ограничения и риски

Кислотная обработка выделяет значительный объём CO_2, поэтому нужны газоотвод, вентиляция, химически стойкие материалы и СИЗ. Смешивание кислотного модуля с SLES, щелочными хелатами или содой недопустимо. При длительном нагреве растворы сульфаминовой кислоты гидролизуются до гидросульфата аммония; образующиеся сульфат-ионы повышают риск осаждения $CaSO_4$, поэтому предел температуры и время контакта устанавливают опытом. Стоки после очистки барита токсичны: нейтрализации по pH недостаточно, барий осаждают в виде сульфата, а шлам утилизируют по экологическим нормативам; сульфаматные стоки содержат связанный азот. Технико-экономическую оценку проводят по экспериментальным расходам реагентов на 1 кг удалённого осадка. Ограничение работы: собственных экспериментальных данных нет, а литературные результаты получены на разных осадках, поэтому сопоставление модулей ориентировочное.

Заключение

1. Очистка должна опираться на идентификацию фазового состава осадка (XRD/XRF) и селективный выбор механизма: кислоты — для карбонатов, хелатирующие или конверсионные системы — для сульфатов Ca и Ba, промывка — для хлоридов.

2. По опубликованным данным, смесь сульфаминовой, лимонной и уксусной кислот сопоставима с 5 %-ным HCl по растворению карбонатов и требует лабораторного подтверждения.

3. Подтверждённо отечественные SLES и кальцинированная сода интегрируются в цикл (обезжиривание, нейтрализация стоков); местная серная кислота для $CaCO_3$ непригодна из-за осадка $CaSO_4$.

4. Теоретический расход — 1,94 кг сульфаминовой или 1,28 кг безводной лимонной кислоты на 1 кг $CaCO_3$. Пятистадийная схема и программа скрининга (с оценкой коррозии по ASTM G31) — методическая основа для создания локализованных составов.

Список литературы

1. Akhdan W. Supriyadi, Dewayanti D.S.S. Studi Penyebab Scale di Lapangan-lapangan Minyak Sumatra // Lembaran Publikasi Minyak dan Gas Bumi. – 2022. – Т. 44, № 3. – P. 227–245. – DOI: 10.29017/LPMGB.44.3.166.

2. Alhamad L., Alrashed A., Al Munif E., Miskimins J. Organic Acids for Stimulation Purposes: A Review // SPE Production & Operations. – 2020. – T. 35, № 4. – P. 952–978. – DOI: 10.2118/199291-PA.
3. Alissa F., Bamigdad S., Alqahtani M., Andersson M., Alsulmi A., Al-baiz A., Almubarak T. Green Descaling of Gypsum Deposits in Industrial Pipelines: A Chelant-Free Approach // ACS Omega. – 2026. – T. 11, № 26. – P. 38972–38984. – DOI: 10.1021/acsomega.6c02108.
4. ASTM International. ASTM G31-21(2025): Standard Guide for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals. – West Conshohocken: ASTM International, 2025. – 10 P. – DOI: 10.1520/G0031-21R25.
5. Basheer C., Shaikh A.A., Al-Mutairi E.M. Noor El Deen M., Qureshi K.K. Calcium Carbonate Scale Inhibition with Ultrasonication and a Commercial Antiscalant // Water. – 2021. – T. 13, № 23. – DOI: 10.3390/w13233428.
6. Chew C.B., Mat R. The Efficacy of Calcium Carbonate Scale Inhibition by Commercial Polymer Scale Inhibitors // Chemical Engineering Transactions. – 2015. – T. 45. – P. 1471–1476. – DOI: 10.3303/CET1545246.
7. Demadis K.D., Lykoudis P. Chemistry of Organophosphonate Scale Growth Inhibitors: 3. Physicochemical Aspects of PBTC and Its Effect on $CaCO_3$ Crystal Growth // Bioinorganic Chemistry and Applications. – 2005. – T. 3, № 3–4. – P. 135–149. – DOI: 10.1155/BCA.2005.135.
8. Hou J., Chen T., Da C., Chen S. Biodegradable Chelating Agents for Effective $CaSO_4$ Scale Removal in Oil and Gas Production // ACS Omega. – 2025. – T. 10, № 42. – P. 50267–50274. – DOI: 10.1021/acsomega.5c06982.
9. Luo Z., Zhang N., Zhao L. et al. A Chelating Agent System for the Removal of Barium Sulfate Scale // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. – 2020. – T. 10. – P. 3069–3079. – DOI: 10.1007/s13202-020-00886-5.
10. Mohammed I., Svenningsen S.W., Kamounah F.S. et al. Calcium Sulfate Scale: A Review of State-of-the-Art // Geoenergy Science and Engineering. – 2024. – T. 242. – DOI: 10.1016/j.geoen.2024.213228.
11. Polychemicals. SLES: сведения о продукте и производителе BEHDASH CHEMICAL CO [Электронный ресурс]. – Б. г. URL: https://polychemicals.uz/en/product/sles/ (дата обращения: 16.11.2026).
12. Prisciandaro M., Mazziotti di Celso G., Lancia A., Musmarra D., Karatza D. Citric Acid as a Green Additive to Retard Calcium Carbonate Scales on Process Equipment // The Canadian Journal of Chemical Engineering. – 1979. – T. 98, № 9. – P. 1973–1979. – DOI: 10.1002/cjce.23783.
13. Republic of Uzbekistan. First Biennial Transparency Report of the Republic of Uzbekistan under the UN Framework Convention on Climate Change: Inventory of Anthropogenic Emissions by Sources and Removals by Sinks of Greenhouse Gases, 1990–2022 [Электронный ресурс]. – Tashkent. – 2024. URL: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/NIR_BTR_kadastrGHG_Uzbekistan_27_10_2025_final_eng.pdf (дата обращения: 14.11.2026).

14. Wulandari M. Verawati, Aziz I., Nofrizal, Kartini R., Raja P.B. The Performance of Sulfamic, Acetic, and Citric Acid as an Alternative Carbonate Scale Dissolution at Laboratory Scale // Scientific Contributions Oil and Gas. – 2025. – T. 48, № 2. – P. 393–403. – DOI: 10.29017/scog.v48i2.1770.

Статья поступила в редакцию: 01.11.2026
Статья принята к публикации: 08.11.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 678.742.3:678.046.36:620.17

DOI: 10.32743/UniTech.2026.152.11.23699

Исследование влияния содержания наполнителей на механические свойства композиционных материалов на основе полипропилена

Юсупова Собира Юнус кизи
базовой докторант
кафедры Химии Навоийский государственный университет
Республика Узбекистан, г. Навои
E-mail: mahmudovazilolaxon@gmail.com

Камалова Дилнавоз Ихтиёровна
проф. кафедры
Физики, д-р техн. наук (DSc) Навоийский государственный университет
Республика Узбекистан, г. Навои

Негматов Сойибжон Содикович
д-р техн. наук (DSc)
проф. акад. Академии наук Республики Узбекистан, Ташкентский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент
ORCID: 0009000100043372

Investigation of the effect of filler content on the mechanical properties of polypropylene-based composite materials

Yusupova Sobira Yunus qizi
PhD, Researcher
Department of Chemistry Navoi State University
Republic of Uzbekistan, Navoi

Kamalova Dilnavoz Ikhtiyorovna
professor
Department of Physics, Doctor of Technical Sciences (DSc), Navoi State University
Republic of Uzbekistan, Navoi

Negmatov Soyibjon Sodikovich
doctor of Technical Sciences (DSc)
professor, Academician of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Библиографическое описание: Юсупова С.Ю. кизи, Камалова Д.И., Негматов С.С. Исследование влияния содержания наполнителей на механические свойства композиционных материалов на основе полипропилена // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23699

Аннотация

Целью исследования является сравнительный анализ влияния содержания графита и карбоната кальция на механические свойства композиционных материалов на основе полипропилена марки J-150. Графит и карбонат кальция вводили в полимер по отдельности в количестве 10, 20 и 30 мас.%. Композиции получали методом смешения в расплаве на пластографе Brabender при температуре 185 °C, скорости вращения 150 об/мин в течение 13 минут. Механические свойства определяли на испытательной машине SHIMADZU AG-X Plus при температуре 20 °C. Результаты показали, что с увеличением содержания карбоната кальция наблюдается закономерное повышение модуля упругости при одновременном снижении максимального напряжения. В композиции, содержащей 30 мас.% карбоната кальция, модуль упругости увеличился на 34,0 % по сравнению с исходным полипропиленом и достиг 1699,23 МПа, тогда как максимальное напряжение снизилось с 32,47 до 25,26 МПа. В композициях с графитом зависимости модуля упругости и деформации от концентрации наполнителя имели немонотонный характер. В образце, содержащем 30 мас.% графита, модуль упругости составил 1955,67 МПа, а максимальное напряжение — 25,72 МПа. При одинаковой массовой доле наполнителей композиционные материалы демонстрировали различное деформационное поведение. Полученные результаты свидетельствуют о том, что выбор состава композиционного материала исключительно по показателю жёсткости является недостаточным. Результаты исследования могут служить экспериментальной основой для разработки полипропиленовых композиций с учётом требований к прочности и деформационным характеристикам.

Abstract

The aim of this study is to comparatively investigate the effects of graphite and calcium carbonate content on the mechanical properties of composite materials based on J-150 grade polypropylene. Graphite and calcium carbonate were separately incorporated into the polymer at concentrations of 10, 20, and 30 wt.%. The composites were prepared by melt mixing using a Brabender plastograph at a temperature of 185 °C and a rotor speed of 150 rpm for 13 minutes. The mechanical properties were determined using a SHIMADZU AG-X Plus universal testing machine at a temperature of 20 °C.

The results demonstrated that increasing the calcium carbonate content led to a consistent increase in the elastic modulus, accompanied by a decrease in the maximum stress. For the composite containing 30 wt.% calcium carbonate, the elastic modulus increased by 34.0 % compared with unfilled polypropylene, reaching 1699.23 MPa, while the maximum stress decreased from 32.47 to 25.26 MPa.

In graphite-filled composites, the dependence of the elastic modulus and strain on filler concentration exhibited a non-monotonic behavior. For the sample containing 30 wt.% graphite, the elastic modulus reached 1955.67 MPa, while the maximum stress was 25.72 MPa.

At identical filler weight fractions, the composite materials exhibited different deformation responses. The obtained results indicate that selecting the composition of a composite material solely on the basis of stiffness is insufficient. The findings provide an experimental basis for the development of polypropylene-based composites, taking into account the requirements for mechanical strength and deformation characteristics.

Ключевые слова: полипропилен, J-150, графит, карбонат кальция, композиционный материал, модуль упругости, механические свойства.

Keywords: polypropylene, J-150, graphite, calcium carbonate, composite material, elastic modulus, mechanical properties.

Введение

Регулирование механических свойств композиционных материалов на основе полипропилена с помощью дисперсных наполнителей является одним из важных направлений выбора материалов для промышленных изделий. Введение наполнителей может способствовать повышению жёсткости полимера, однако прочность и деформационная способность материала при этом изменяются неоднозначно. В связи с этим эффективность композиционного материала необходимо определять на основе комплексной оценки нескольких механических показателей.

В исследованиях полипропилена (ПП), наполненного карбонатом кальция, размер частиц, содержание минерального наполнителя и свойства полимерной матрицы рассматриваются как важные факторы, влияющие на характеристики композиционного материала [2]. Y. Peng и соавторы установили, что введение $CaCO_3$ в гомополимерный полипропилен сопровождается повышением модуля упругости при растяжении и одновременным снижением прочности [6]. В исследовании C. Webb и соавторов, посвящённом ударопрочному сополимеру полипропилена, также показано, что увеличение содержания минерального наполнителя оказывает различное влияние на жёсткость и прочность материала [8].

Одним из факторов, определяющих механические характеристики композиционных материалов, является степень диспергирования частиц наполнителя. A. Kiss и соавторы показали, что поверхностное покрытие изменяет характер взаимодействия между частицами, однако не обеспечивает полного устранения их агломерации [5]. M. Rahmani и соавторы, а также Y. Hernández и соавторы исследовали влияние обработки поверхности $CaCO_3$ стеариновой кислотой на дисперсность наполнителя и перерабатываемость композиционных материалов [3, 7]. Y. Zhu и соавторы установили, что при оценке распределения минерального наполнителя в композиционном материале результаты зависят от исследуемой поверхности и применяемого метода анализа [11]. N.S. Yousef использовал подход статистической оценки влияния добавок в составе полипропилена на основе совокупности механических показателей [9].

Результаты указанных исследований свидетельствуют о необходимости разграничения влияния содержания наполнителя, степени его диспергирования и технологических факторов переработки при интерпретации механических свойств композиционных материалов.

Для углеродсодержащих наполнителей метод смешения также имеет существенное значение. X. Zhao и соавторы применили метод сдвигового смешения в твёрдой фазе для распределения графеновых нанопластинок в полипропиленовой матрице [10]. Однако результаты, полученные для систем с графеновыми нанопластинками, не могут быть непосредственно перенесены на композиционные материалы, наполненные обычным графитовым порошком.

В настоящем исследовании проведён сравнительный анализ механических характеристик композиционных материалов на основе полипропилена марки J-150, содержащих графит и $CaCO_3$, вводимые по отдельности, при одинаковых технологических условиях получения.

Целью работы является установление влияния содержания наполнителей в диапазоне 10–30 мас.% на модуль упругости, максимальное напряжение и зарегистрированную деформацию полипропиленовых композиционных материалов.

Материалы и методы

В качестве полимерной матрицы использовали полипропилен марки J-150. Согласно характеристикам производителя, данный полимер представляет собой ударопрочный блок-сополимер, содержащий этилен в качестве сомономера. В связи с этим полимерная матрица, использованная в настоящем исследовании, не рассматривается как гомополимерный полипропилен.

В качестве наполнителей использовали графитовый порошок и карбонат кальция. Графит рассматривался как углеродный кристаллический наполнитель, а $CaCO_3$ — как минеральный наполнитель. Для обоих наполнителей были выбраны концентрации 10, 20 и 30 мас.%. В качестве контрольного образца использовали ненаполненный полипропилен.

Таблица 1. Состав композиций и дозировка компонентов

Код образца	Состав	ПП/наполнитель, мас.%	ПП, г	Наполнитель, г
PP-0	Sof PP	100/0	20	0
C-10	PP/$CaCO_3$	90/10	18	2
C-20	PP/$CaCO_3$	80/20	16	4
C-30	PP/$CaCO_3$	70/30	14	6
G-10	PP/grafit	90/10	18	2
G-20	PP/grafit	80/20	16	4
G-30	PP/grafit	70/30	14	6

Образцы изготавливали методом смешения в расплаве на пластографе Brabender. Установку предварительно нагревали до рабочей температуры, после чего смесительную камеру очищали от остатков ранее переработанного материала. Гранулы полипропилена загружали поэтапно. После расплавления полимерной матрицы вводили наполнитель в соответствии с заданной рецептурой.

Смешение проводили при температуре 185°C и скорости вращения роторов 150 об/мин в течение 13 минут. Общая масса каждой композиции составляла 20 г. Полученные композиционные материалы извлекали из смесительной камеры, после чего формировали образцы для механических испытаний.

Испытания на растяжение проводили на универсальной испытательной машине SHIMADZU AG-X Plus при температуре 20°C. Начальная расчётная длина образца составляла 50 мм, ширина — 5 мм, толщина — 2,5 мм. Скорость растяжения до достижения деформации 0,3 % составляла 1 мм/мин, на последующем этапе — 20 мм/мин.

В представленных ниже результатах сохранён показатель «максимальная деформация», приведённый в исходной таблице экспериментальных данных. Уточнение того, соответствует ли данный показатель деформации при разрыве или деформации в другой характерной точке, требует анализа исходного файла испытаний. Модуль упругости также представлен в соответствии с исходными данными как показатель, определённый в области деформации до 0,3 %.

Результаты и обсуждение

Механические характеристики композиционных материалов ПП/$CaCO_3$ представлены в таблице 2.

Таблица 2. Механические характеристики композиционных материалов, наполненных карбонатом кальция

$CaCO_3$, мас.%	**Модуль упругости, МПа**	**Максимальное напряжение, МПа**	**Зарегистрированная деформация, %**
0	1268,01	32,47	370,88
10	1459,65	29,21	372,30
20	1580,83	27,73	430,11
30	1699,23	25,26	306,49

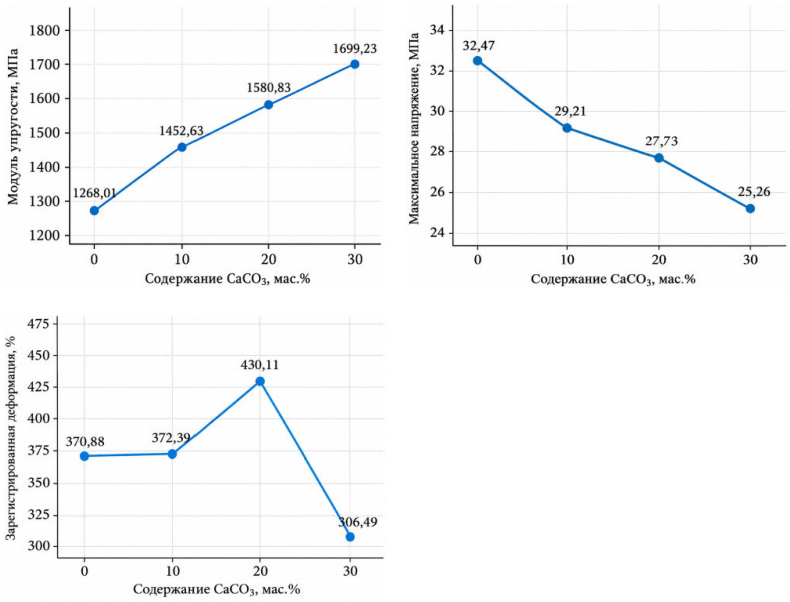


Рисунок 1. Влияние содержания $CaCO_3$ на механические свойства полипропиленовых композиций: а) модуль упругости; б) максимальное напряжение; в) зарегистрированная деформация

При увеличении содержания $CaCO_3$ от 0 до 30 мас.% модуль упругости повысился с 1268,01 до 1699,23 МПа, что соответствует увеличению на 34,0 %. В указанном диапазоне максимальное напряжение снизилось с 32,47 до 25,26 МПа, что свидетельствует о том, что повышение жёсткости материала не сопровождалось увеличением его прочности. Зарегистрированная деформация изменялась немонотонно, достигая максимального значения 430,11 % при содержании 20 мас.% $CaCO_3$. Полученные результаты указывают на необходимость комплексной оценки модуля упругости, прочности и деформационных характеристик при выборе состава композиционного материала.

Влияние содержания графита. Результаты механических испытаний образцов ПП/графит представлены в таблице 3.

Таблица 3. Механические характеристики композиционных материалов, наполненных графитом

$CaCO_3$, мас.%	Модуль упругости, МПа	Максимальное напряжение, МПа	Зарегистрированная деформация, %
0	1268,01	32,47	370,88
10	1712,11	29,55	6,62
20	1450,70	26,50	338,86
30	1955,67	25,72	5,47

Во всех композициях, содержащих графит, зарегистрированные значения модуля упругости превышали соответствующий показатель ненаполненного полипропилена. Однако с увеличением содержания графита монотонного повышения модуля упругости не наблюдалось: при содержании 20 мас.% отмечалось снижение данного показателя по сравнению с образцом, содержащим 10 мас.% графита, тогда как при 30 мас.% было зафиксировано его максимальное значение.

С увеличением содержания графита максимальное напряжение снижалось с 29,55 до 25,72 МПа. Несмотря на то что модуль упругости композиции, содержащей 30 мас.% графита, был приблизительно на 54,2% выше, чем у исходной полимерной матрицы, максимальное напряжение оказалось примерно на 20,8 % ниже.

В результатах измерения деформации наблюдались существенные различия: для образцов, содержащих 10 и 30 мас.% графита, зарегистрированные значения составили соответственно 6,62 и 5,47%, тогда как для композиции с 20 мас.% графита данный показатель достиг 338,86 %. Объяснение столь значительных различий исключительно влиянием концентрации наполнителя является недостаточным. Для корректной интерпретации полученных результатов необходимо проверить идентификацию образцов, расчётную длину, источник данных измерения деформации, а также результаты повторных испытаний.

Сравнительный анализ влияния наполнителей. При одинаковом массовом содержании графит и $CaCO_3$ оказывали различное влияние на механические характеристики полипропиленовых композиций. При концентрации 30 мас.% модуль упругости композиции с графитом превышал соответствующий показатель материала, наполненного $CaCO_3$, тогда как значения максимального напряжения были близкими. При этом зарегистрированные значения деформации существенно различались.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что выбор наполнителя исключительно по критерию достижения высокого модуля упругости является недостаточным. В зависимости от функционального назначения изделия необходимо устанавливать отдельные требования к жёсткости, прочности и деформационной способности композиционного материала. На основании имеющихся экспериментальных данных невозможно сделать обоснованные выводы о преимуществах исследуемых композиций по электропроводности, ударной вязкости или термической стабильности.

В представленных таблицах отсутствуют данные индивидуальных повторных измерений и значения стандартных отклонений. В связи с этим различия между исследуемыми композициями не оценивались с точки зрения статистической значимости. Обсуждение результатов ограничено анализом зарегистрированных численных значений и выявленных тенденций их изменения.

Заключение

В композиционных материалах ПП/$CaCO_3$ на основе полипропилена марки J-150 увеличение содержания минерального наполнителя в диапазоне 10–30 мас.% сопровождалось последовательным повышением модуля упругости и снижением максимального напряжения. При содержании 30 мас.% $CaCO_3$ модуль упругости был на 34,0 % выше по сравнению с исходной полимерной матрицей.

В композициях, содержащих графит, наблюдалось снижение максимального напряжения, тогда как модуль упругости и деформация изменялись немонотонно. Наибольшее значение модуля упругости — 1955,67 МПа — было зарегистрировано

в композиции, содержащей 30 мас.% графита. Однако данный результат не свидетельствует о том, что указанный состав является оптимальным по совокупности всех механических характеристик.

При выборе типа и содержания наполнителя необходимо проводить комплексную оценку жёсткости, прочности и деформационной способности композиционных материалов. Повторная проверка результатов измерения деформации для композиций с графитом, а также определение статистического разброса экспериментальных данных для всех исследуемых составов позволят повысить достоверность окончательных выводов исследования.

Список литературы

1. Карабаева, М.А. Особенности диэлектрической проницаемости композиционных керамических материалов, содержащих наночастицы никеля / М.А. Карабаева, С.Ю. Юсупова // Материалы Республиканской научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития фотоники». – 2022. – С. 240–243.
2. Al-Samhan M., Al-Attar F. Comparative analysis of the mechanical, thermal and barrier properties of polypropylene incorporated with $CaCO_3$ and nano $CaCO_3$ // Surfaces and Interfaces. – 2022. – T. 31. – Art. 102055. – DOI: 10.1016/j.surfin.2022.102055.
3. Hernández Y., Lozano T. et al. Stearic acid as interface modifier and lubricant agent of the system: Polypropylene/calcium carbonate nanoparticles // Polymer Engineering & Science. – 2019. – T. 59. – P. E279–E285. – DOI: 10.1002/pen.25053.
4. Kamalova D., Yusupova S.Yu. Devolpment of polyaniline-based composite ion-exchange materials and investigation of their physicochemical properties // The International Conference on Advanced Materials for Optics and Photonics Chemistry and Engineering Perspectives (AMOR. – 2026.
5. Kiss A., Fekete E., Pukánszky B. Aggregation of $CaCO_3$ particles in PP composites: Effect of surface coating // Composites Science and Technology. – 2007. – T. 67, № 7–8. – P. 1574–1583. – DOI: 10.1016/j.compscitech.2006.07.010.
6. Peng Y., Musah M., Via B., Wang X. Calcium Carbonate Particles Filled Homopolymer Polypropylene at Different Loading Levels: Mechanical Properties Characterization and Materials Failure Analysis // Journal of Composites Science. – 2021. – T. 5, № 11. – Art. 302. – DOI: 10.3390/jcs5110302.
7. Rahmani M., Ghasemi F.A., Payganeh G. Effect of surface modification of calcium carbonate nanoparticles on their dispersion in the polypropylene matrix using stearic acid // Mechanics & Industry. – 2014. – T. 15. – P. 63–67. – DOI: 10.1051/meca/2014009.
8. Webb C., Qi K., Anguilano L., Schmidt Rivera X. Mechanical and environmental evaluation of ground calcium carbonate ($CaCO_3$) filled polypropylene composites as a sustainable alternative to virgin polypropylene // Results in Materials. – 2024. – T. 22. – Art. 100562. – DOI: 10.1016/j.rinma.2024.100562.
9. Yousef N.S. Statistical Study on Additives Used to Improve Mechanical Properties of Polypropylene // Polymers. – 2022. – T. 14, № 1. – Art. 179. – DOI: 10.3390/polym14010179.

10. Zhao X., Huang D., Ewulonu C.M., Wu M., Wang C., Huang Y. Polypropylene/graphene nanoplatelets nanocomposites with high conductivity via solid-state shear mixing // e-Polymers. – 2021. – T. 21, № 1. – P. 520–532. – DOI: 10.1515/epoly-2021-0039.
11. Zhu Y.D., Allen G.C., Jones P.G., Adams J.M., Gittins D.I., Heard P.J., Skuse D.R. Dispersion characterisation of $CaCO_3$ particles in PP/$CaCO_3$ composites // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2014. – T. 60. – P. 38–43. – DOI: 10.1016/j.compositesa. 2014.01.012.

References

1. Karabaeva M.A., Yusupova S.Yu. [Features of the dielectric permittivity of composite ceramic materials containing nickel nanoparticles] // Materialy Respublikanskoj nauchno-prakticheskoj konferentsii «Problemy i perspektivy razvitiya fotoniki». Urgench. – 2022. (In Russ.).
2. Al-Samhan M., Al-Attar F. Comparative analysis of the mechanical, thermal and barrier properties of polypropylene incorporated with $CaCO_3$ and nano $CaCO_3$ // Surfaces and Interfaces. – 2022. – Vol. 31. – Art. 102055. – DOI: 10.1016/j.surfin.2022.102055.
3. Hernández Y., Lozano T. et al. Stearic acid as interface modifier and lubricant agent of the system: Polypropylene/calcium carbonate nanoparticles // Polymer Engineering & Science. – 2019. – Vol. 59. – P. E279–E285. – DOI: 10.1002/pen.25053.
4. Kamalova D., Yusupova S.Yu. Devolpment of polyaniline-based composite ion-exchange materials and investigation of their physicochemical properties // The International Conference on Advanced Materials for Optics and Photonics Chemistry and Engineering Perspectives (AMOR. – 2026.
5. Kiss A., Fekete E., Pukánszky B. Aggregation of $CaCO_3$ particles in PP composites: Effect of surface coating // Composites Science and Technology. – 2007. – Vol. 67, No. 7–8. – P. 1574–1583. – DOI: 10.1016/j.compscitech.2006.07.010.
6. Peng Y., Musah M., Via B., Wang X. Calcium Carbonate Particles Filled Homopolymer Polypropylene at Different Loading Levels: Mechanical Properties Characterization and Materials Failure Analysis // Journal of Composites Science. – 2021. – Vol. 5, No. 11. – Art. 302. – DOI: 10.3390/jcs5110302.
7. Rahmani M., Ghasemi F.A., Payganeh G. Effect of surface modification of calcium carbonate nanoparticles on their dispersion in the polypropylene matrix using stearic acid // Mechanics & Industry. – 2014. – Vol. 15. – P. 63–67. – DOI: 10.1051/meca/2014009.
8. Webb C., Qi K., Anguilano L., Schmidt Rivera X. Mechanical and environmental evaluation of ground calcium carbonate ($CaCO_3$) filled polypropylene composites as a sustainable alternative to virgin polypropylene // Results in Materials. – 2024. – Vol. 22. – Art. 100562. – DOI: 10.1016/j.rinma.2024.100562.
9. Yousef N.S. Statistical Study on Additives Used to Improve Mechanical Properties of Polypropylene // Polymers. – 2022. – Vol. 14, No. 1. – Art. 179. – DOI: 10.3390/ polym14010179.

10. Zhao X., Huang D., Ewulonu C.M., Wu M., Wang C., Huang Y. Polypropylene/graphene nanoplatelets nanocomposites with high conductivity via solid-state shear mixing // e-Polymers. – 2021. – Vol. 21, No. 1. – P. 520–532. – DOI: 10.1515/epoly-2021-0039.
11. Zhu Y.D., Allen G.C., Jones P.G., Adams J.M., Gittins D.I., Heard P.J., Skuse D.R. Dispersion characterisation of $CaCO_3$ particles in PP/$CaCO_3$ composites // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2014. – Vol. 60. – P. 38–43. – DOI: 10.1016/j.compositesa.2014.01.012.

НЕФТЯНАЯ И ГАЗОВАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ. ПЕРЕРАБОТКА УГЛЕВОДОРОДНОГО СЫРЬЯ

Статья поступила в редакцию: 23.10.2026
Статья принята к публикации: 31.10.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 622.244.442

Применение композиционного реагента КХР-Д в минерализованных буровых растворах для предупреждения сальникообразования

Хайдаров Ислом Косимович
д-р философии (PhD) по техн. наукам, доц.
Каршинский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Карши

Жураев Анвар
магистр Каршинский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Карши

Application of the composite reagent KKHR-D in mineralized drilling fluids to prevent bit balling

Khaydarov Islam Kosimovich
doctor of philosophy (PhD)
in technical sciences, associate professor of Karshi State Technical University
Republic of Uzbekistan, Karshi

Jurayev Anvar
master of Karshi State Technical University
Republic of Uzbekistan, Karshi

Аннотация

Цель работы — оценить эффективность композиционного реагента КХР-Д, полученного щелочным гидролизом пивной дробины, в буровых растворах на минерализованных пластовых водах и в промысловых условиях при бурении глинистых интервалов. Изучен состав пластовых вод площадей Учкызыл, Сауле и Арал-4; стандартными методами определены технологические параметры растворов с 1–10 % реагента. Опытно-промышленное испытание проведено на скважине № 169 месторождения Южный Кемачи. Установлено, что 5 % КХР-Д снижает показатель фильтрации раствора на пластовой воде с хлоридами до 37 г/л с более, чем 40 до 3 см³/30 мин., уменьшает толщину корки до 0,3–0,5 мм и повышает $СНС_1$ с 3,2 до 12,4 дПа. При бурении интервала 432–2280 м показатель фильтрации снизился с 35 до 6 см³/30 мин., сальники на долоте и КНБК не

Библиографическое описание: Хайдаров И.К., Жураев А. Применение композиционного реагента КХР-Д в минерализованных буровых растворах для предупреждения сальникообразования // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23662

образовывались, затяжки и посадки отсутствовали, механическая скорость возросла на 6–8 м/ч. Эффект объясняется формированием на частицах шлама граничного слоя реагента и тонкой фильтрационной корки со слабой адгезией к металлу. Стоимость 1 м³ раствора снижается на 23,7 %.

Abstract

The aim is to evaluate the brewer's spent grain based reagent KKhR-D in drilling fluids on mineralized formation waters and in the field. Formation waters of the Uchkyzyl, Saule and Aral-4 areas were analysed and fluids with 1–10 % of the reagent were tested by standard methods. A field trial was carried out in well No. 169 of the South Kemachi field. 5 % KKhR-D reduces the fluid loss of a fluid on formation water with up to 37 g/L chlorides from over 40 to 3 cm³/30 min. In the 432–2280 m interval the fluid loss fell from 35 to 6 cm³/30 min, no balling of the bit and BHA, drag or set-down was observed, and the rate of penetration increased by 6–8 m/h. The cost of 1 m³ of fluid decreases by 23.7 %.

Ключевые слова: буровой раствор, сальникообразование, пластовая вода, композиционный реагент, пивная дробина, показатель фильтрации, опытно-промышленное испытание.

Keywords: drilling fluid, bit balling, formation water, composite reagent, brewer's spent grain, fluid loss, field trial.

Введение

Значительная часть разрезов скважин Узбекистана сложена пластичными глинистыми породами, при бурении которых на долоте и элементах КНБК образуются сальники. Они снижают механическую скорость и вызывают затяжки и прихваты [1]. Сальник формируется, когда частицы шлама, впитывая воду из раствора, переходят в пластичное состояние: когезия частиц падает, а их адгезия к металлу растёт [2; 6]. Предупредить это можно ингибированием глин и созданием на шламе граничного слоя [5; 6].

На площадях Республики Узбекистан для приготовления растворов часто используют высокоминерализованные пластовые воды, в которых многие полимерные стабилизаторы теряют эффективность. Поэтому актуальны солестойкие реагенты [9; 11], особенно из доступного вторичного сырья [8; 10], а также ингибирующие системы на основе природных полимеров [7]. Ранее был разработан реагент КХР-Д на основе продуктов щелочного гидролиза пивной дробины — поверхностно-активный полиамфолит [4].

Цель работы — оценить эффективность поверхностно-активного полиамфолита в растворах на минерализованных пластовых водах и при бурении скважины.

Материалы и методы

Исследовали две модификации реагента: КХР-Д-1 и КХР-Д-2 —порошкообразные смеси омылённой дробины с композиционным реагентом КХР, пластовые воды хлоридного типа с высоким содержанием Ca^{2+} и Mg^{2+} (табл. 1). Исходные растворы готовили на шорсуйской глине и пластовой воде; для воды Учкызыл в раствор дополнительно вводили

8 % нефти. Плотность измеряли ареометром АБР-1, условную вязкость — вискозиметром ВБР-1, показатель фильтрации и толщину корки — прибором ВМ-6, СНС через 1 и 10 минут — прибором СНС-2, pH — pH-метром [3; 5].

Таблица 1. Химический состав пластовых вод, мг/л

Площадь, скважина	pH	$Na^+(+K^+)$	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}
Учкызыл, скв. 1	–	11 610	1 510	520	18 200	3 840
Сауле	5,3	12 015	1 560	559	21 276	2 189
Арал-4	6,1	20 695	700	5 229	37 233	15 020

Опытно-промышленное испытание проведено на скважине № 169 месторождения Южный Кемачи, где при бурении глинистых интервалов предыдущих скважин часто приходилось поднимать инструмент для снятия сальников. Конструкция: кондуктор 298,45 мм — 432 м, техническая колонна 219 мм — 2280 м, эксплуатационная 140 мм — 2320 м; бурение роторное долотом PDC с КНБК 269,9 мм.

Результаты и обсуждение

Исходные растворы на пластовых водах имеют фильтрацию 40 см³/30 мин. и более и корку 4–6 мм (табл. 2). В растворе на воде Учкызыл 5 % КХР-Д-1 (с 8 % нефти) снижает фильтрацию с 40 до 5 см³/30 мин., корку – с 4,0 до 0,5 мм.

Таблица 2. Параметры раствора на пластовой воде Арал-4 с добавкой КХР-Д-2

Состав	ρ, г/см³	УВ, с	Ф, см³/30 мин	К, мм	pH	$СНС_1/СНС_{10}$, дПа
Арал-4: исходный	1,22	21	> 40	5–6	7,0	3,2 / 4,8
+ 1 % КХР-Д-2	1,23	26	16	2	7,5	4,7 / 7,2
+ 3 % КХР-Д-2	1,22	38	7	1,2	8,0	6,1 / 8,3
+ 5 % КХР-Д-2	1,21	42	3	0,4	9,0	12,4 / 18,5

Введение 3–5 % реагента снижает показатель фильтрации в 8–13 раз, корку — до 0,4–0,5 мм, а СНС растёт почти в четыре раза, т. е. раствор становится структурированным даже в воде Арал-4 с 37 г/л хлоридов. На воде Сауле раствор с 5 % КХР-Д-2 был стабилен 10 суток, корка имела слабую адгезию к металлу. Слабая адгезия корки и тонкий граничный слой реагента на частицах шлама препятствуют их прилипанию к долоту, а минерализованный фильтрат ограничивает гидратацию глины, поэтому шлам не переходит в пластичное состояние и легко смывается [2; 6].

На скважине № 169 после цементирования кондуктора 150 м³ раствора (плотность 1,25 г/см³, фильтрация 35 см³/30 мин, pH 7) обработали 5 % КХР-Д; далее раствор периодически пополняли свежими порциями. Изменение параметров по интервалам показано в таблице 3.

Таблица 3. Параметры раствора при бурении скважины № 169 Южный Кемачи

Интервал, м	ρ, г/см³	УВ, с	Ф, см³/30 мин	К, мм	pH	КХР-Д, кг
0–432 (без реагента)	1,25	42	35	5,0	7	–
432–800	1,26	49	15	1,5	8	9 200
800–1600	1,28	53	10	1,2	9	5 800
1600–1900	1,29	55	8	1,0	9	3 500
1900–2280	1,31	57	6	1,0	9	4 000

Раствор оставался стабильным и сохранял тиксотропные свойства. При каждом подъёме сальники на долоте не обнаружены, по индикатору веса ГИВ-6 затяжки и посадки не зафиксированы, механическая скорость возросла на 6–8 м/ч. По действующим ценам стоимость 1 м³ раствора с КХР-Д составляет 1 270 000 сум против 1 665 000 сум для применявшегося раствора, т. е. на 23,7 % ниже; при расходе 450 м³ на скважину экономия составляет 177,75 млн сум.

Заключение

Реагент КХР-Д эффективен в растворах на высокоминерализованных пластовых водах: 3–5 % добавки снижают фильтрацию до 3–7 см³/30 мин. и формируют тонкую корку. Промысловое испытание подтвердило предупреждение сальникообразования, рост механической скорости на 6–8 м/ч. и снижение стоимости раствора на 23,7 %. Реагент рекомендован для бурения глинистых интервалов на месторождениях АО «Узбекнефтегаз».

Список литературы

1. Басарыгин Ю.М., Булатов А.И., Проселков Ю.М. Осложнения и аварии при бурении нефтяных и газовых скважин. – М.: Недра-Бизнесцентр, 2000. – 679 с.
2. Грей Дж.Р., Дарли Г.С. Состав и свойства буровых агентов (промывочных жидкостей) / пер. с англ. – М.: Недра, 1985. – 509 с.
3. Икрамова М.Э., Негматов С.С., Негматова К.С. Исследование свойств органоминеральных утяжелителей и возможность их применения при получении утяжеленных буровых растворов, применяемых при бурении нефтегазовых скважин // Universum: технические науки. – 2020. – № 11 (80). – С. 46–50. – DOI: 10.32743/UniTech.2020.80.11–3.46–50.
4. Негматов С.С., Негматова К.С., Икрамова М.Э., Дустмурадов Э.Б. Разработка эффективных составов химических реагентов-добавок (КХР-Д) к буровым растворам на основе местного сырья // Композиционные материалы. – 2023. – № 3. – С. 241–242.
5. Рязанов Я.А. Энциклопедия по буровым растворам. – Оренбург: Летопись, 2005. – 664 с.
6. Христенко А.В. Обоснование химической обработки буровых растворов для предупреждения сальникообразования при разбуривании пластичных горных пород: автореф. дис. … канд. техн. наук: 25.00.15. – Уфа, 2010. – 24 с.

7. Huang C., Mu L., Gong X. The development of an alginate drilling fluid treatment agent for shale and a study on the mechanism of wellbore stability sealing // Processes. – 2025. – T. 13, № 4. – Art. 1250. – DOI: 10.3390/pr13041250.
8. Ikram R., Mohamed Jan B., Sidek A., Kenanakis G. Utilization of eco-friendly waste generated nanomaterials in water-based drilling fluids; state of the art review // Materials. – 2021. – T. 14, № 15. – Art. 4171. – DOI: 10.3390/ma14154171.
9. Li J., Sun J., Lv K. [et al.] Temperature- and salt-resistant micro-crosslinked polyampholyte gel as fluid-loss additive for water-based drilling fluids // Gels. – 2022. – T. 8, № 5. – Art. 289. – DOI: 10.3390/gels8050289.
10. Madu C., Faraji F., Abdalqadir M. [et al.] Feasibility study of biodegradable coffee ground waste and watermelon rind as water-based drilling fluid additives // Gas Science and Engineering. – 2024. – T. 125. – Art. 205322. – DOI: 10.1016/j.jgsce.2024.205322.
11. Wei Z., Wang M., Li Y. [et al.] Sodium alginate as an eco-friendly rheology modifier and salt-tolerant fluid loss additive in water-based drilling fluids // RSC Advances. – 2022. – T. 12, № 46. – P. 29852–29864. – DOI: 10.1039/D2RA04448J.

References

1. Basarygin Yu.M., Bulatov A.I., Proselkov Yu.M. [Complications and accidents in drilling oil and gas wells]. Moscow: Nedra-Biznestsentr, 2000. 679 P. (In Russ.).
2. Grey Dzh.R., Darli G.S. Grey Dzh.R., Darli G.S. [Composition and properties of drilling fluids]. Moscow: Nedra, 1985. – Moscow: Nedra, 1985. – 509 P. (In Russ.).
3. Ikramova M.E., Negmatov S.S., Negmatova K.S. [Research of the properties of organomineral weighting agents and the possibility of their use in the production of weighted drilling fluids used in drilling oil and gas wells]. Universum: tekhnicheskiye nauki, 2020, no. 11 (80), P. 46–50. DOI: 10.32743/UniTech.2020.80.11–3.46–50. (In Russ.).
4. Negmatov S.S., Negmatova K.S., Ikramova M.E., Dustmuradov E.B. [Development of effective compositions of chemical reagent additives (KKhR-D) for drilling fluids based on local raw materials]. Kompozitsionnyye materialy, 2023, no. 3, P. 241–242. (In Russ.).
5. Ryazanov Ya.A. [Encyclopedia of drilling fluids]. Orenburg: Letopis', 2005. 664 P. (In Russ.).
6. Khristenko A.V. [Substantiation of chemical treatment of drilling fluids to prevent bit balling when drilling plastic rocks]. Abstract of Cand. Sci. (Eng.) diss. Ufa, 2010. 24 P. (In Russ.).
7. Huang C., Mu L., Gong X. The development of an alginate drilling fluid treatment agent for shale and a study on the mechanism of wellbore stability sealing. Processes, 2025, vol. 13, no. 4, art. 1250. DOI: 10.3390/pr13041250.
8. Ikram R., Mohamed Jan B., Sidek A., Kenanakis G. Utilization of eco-friendly waste generated nanomaterials in water-based drilling fluids; state of the art review. Materials, 2021, vol. 14, no. 15, art. 4171. DOI: 10.3390/ma14154171.
9. Li J., Sun J., Lv K., et al. Temperature- and salt-resistant micro-crosslinked polyampholyte gel as fluid-loss additive for water-based drilling fluids. Gels, 2022, vol. 8, no. 5, art. 289. DOI: 10.3390/gels8050289.

10. Madu C., Faraji F., Abdalqadir M., et al. Feasibility study of biodegradable coffee ground waste and watermelon rind as water-based drilling fluid additives. Gas Science and Engineering, 2024, vol. 125, art. 205322. DOI: 10.1016/j.jgsce.2024.205322.
11. Wei Z., Wang M., Li Y., et al. Sodium alginate as an eco-friendly rheology modifier and salt-tolerant fluid loss additive in water-based drilling fluids. RSC Advances, 2022, vol. 12, no. 46, P. 29852–29864. DOI: 10.1039/D2RA04448J.

МЕТАЛЛУРГИЯ, МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ГОРНОЕ ДЕЛО

Статья поступила в редакцию: 10.11.2026
Статья принята к публикации: 20.11.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 669.018.25+621.762.2+621.762.5

Влияние продолжительности механического легирования на структуру и уплотнение твердого сплава WC–6FeCrNiWMo с высокоэнтропийной связкой при искровом плазменном спекании

Асадова Маржона Акмал кизи
независимый исследователь, Навоийское отделение Академии наук Республики Узбекистан
Республика Узбекистан, г. Навои

Каюмов Баходир Бабакул угли
доц.
Навоийский государственный горно-технологический университет
Республика Узбекистан, г. Навои
E-mail: bqayumov1993@gmail.com

Бозоров Аминжон Нуриллоевич
д-р техн. наук
ст. науч. сотр. Государственное учреждение «Фан ва тараккиёт» при Ташкентском государственном техническом университете имени Ислама Каримова
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: amin_109@inbox.ru

Effect of mechanical alloying duration on the structure and densification of WC–6FeCrNiWMo hardmetal with a high-entropy alloy binder produced by spark plasma sintering

Asadova Marjona
Independent Researcher
Navoi Branch of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan
Republic of Uzbekistan, Navoi

Qayumov Bahodir
Associate Professor
Navoi State University of Mining and Technology
Republic of Uzbekistan, Navoi

Библиографическое описание: Асадова М.А. кизи, Каюмов Б.Б.У., Бозоров А.Н. Влияние продолжительности механического легирования на структуру и уплотнение твердого сплава WC–6FeCrNiWMo с высокоэнтропийной связкой при искровом плазменном спекании // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23775

Bozorov Aminjon
doctor of Technical Sciences
Senior Research Fellow, “Fan va Taraqqiyot” State Institution under Tashkent State Technical University named after Islam Karimov
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

Цель работы – установить влияние продолжительности механического легирования (МЛ) на морфологию порошков, параметры кристаллической структуры и уплотнение твердого сплава WC–6FeCrNiWMo, в котором кобальтовая связка заменена эквиатомным высокоэнтропийным сплавом (ВЭС) Fe–Cr–Ni–W–Mo. Сплав состава 94 масс.% WC + 6 масс. % ВЭС получали МЛ порошков в планетарной мельнице (БПР 10:1, 400 об/мин, 3–25 ч), холодным прессованием при 150 МПа и искровым плазменным спеканием (ИПС) при 1250 °C, 30 МПа и выдержке 5 мин. Структуру исследовали методами сканирующей электронной микроскопии с анализом изображений, рентгенофазового анализа (методы Шеррера и Уильямсона–Холла) и энергодисперсионной спектроскопии; плотность определяли гидростатическим взвешиванием. Установлено, что при увеличении времени МЛ с 3 до 20 ч средний размер частиц уменьшается с 18,6 ± 2,8 до 4,5 ± 0,9 мкм (на 75,8 %), размер кристаллитов WC – с 48 до 15 нм, ширина основного рефлекса возрастает с 0,17° до 0,56°, а микродеформация решетки – до ≈2,0 %. После 20 ч измельчение достигает насыщения, а при 25 ч начинается повторная агломерация. ИПС порошка после 20 ч МЛ обеспечивает относительную плотность 97,64 ± 0,26 % (у сплава WC–6Co – 96,99 ± 0,40 %) при равномерном распределении Fe, Cr, Ni и Mo в связке между зернами WC. Режим МЛ продолжительностью 20 ч рекомендован для получения бескобальтовых твердых сплавов для режущего инструмента.

Abstract

The aim of the work is to establish the effect of mechanical alloying (MA) duration on powder morphology, crystal structure parameters and densification of the WC–6FeCrNiWMo hardmetal in which the cobalt binder is replaced by an equiatomic Fe–Cr–Ni–W–Mo high-entropy alloy (HEA). The alloy containing 94 wt.% WC and 6 wt.% HEA was produced by MA of powders in a planetary mill (ball-to-powder ratio 10:1, 400 rpm, 3–25 h), cold pressing at 150 MPa and spark plasma sintering (SPS) at 1250 °C and 30 MPa with a 5 min dwell. The structure was studied by scanning electron microscopy with image analysis, X-ray diffraction (Scherrer and Williamson–Hall methods) and energy-dispersive spectroscopy; density was measured by hydrostatic weighing. Increasing the MA time from 3 to 20 h reduces the mean particle size from 18.6 ± 2.8 to 4.5 ± 0.9 μm (by 75.8 %) and the WC crystallite size from 48 to 15 nm, while the full width at half maximum of the main reflection grows from 0.17° to 0.56° and the lattice microstrain reaches ≈2.0 %. After 20 h, refinement reaches saturation, and re-agglomeration begins at 25 h. SPS of the powder milled for 20 h yields a relative density of 97.64 ± 0.26 % (96.99 ± 0.40 % for WC–6Co) with a uniform distribution of Fe, Cr, Ni and Mo in the binder between WC grains. An MA duration of 20 h is recommended for producing cobalt-free hardmetals for cutting tools.

Ключевые слова: твердый сплав, карбид вольфрама, высокоэнтропийный сплав, механическое легирование, искровое плазменное спекание, микроструктура, плотность.

Keywords: cemented carbide, tungsten carbide, high-entropy alloy, mechanical alloying, spark plasma sintering, microstructure, density.

Введение

Твердые сплавы на основе карбида вольфрама с кобальтовой связкой (WC–Co) остаются основным материалом режущих пластин для обработки сталей благодаря сочетанию высокой твердости, прочности и износостойкости. Свойства таких сплавов определяются не только размером и морфологией зерен WC, но и составом, структурой и распределением металлической связки, а также состоянием межфазных границ WC/связка [5; 12]. Вместе с тем кобальт относится к дефицитным и дорогостоящим видам сырья, а при высоких контактных нагрузках и температурах резания пластическая деформация кобальтовой прослойки способствует выкрашиванию зерен WC и ускоряет износ инструмента. Поэтому поиск альтернативных связок, сохраняющих или улучшающих функциональные свойства WC–Co, является актуальной задачей материаловедения.

Одним из перспективных направлений является применение в качестве связки высокоэнтропийных сплавов (ВЭС) – многокомпонентных систем из пяти и более элементов в близких к эквиатомным концентрациях [4; 7; 8]. Для ВЭС характерны твердорастворное упрочнение за счет искажений кристаллической решетки, замедленная диффузия и повышенная термическая стабильность. Показано, что связки CoNiFeCr [11] и ГЦК-ВЭС, полученные механическим легированием [14], обеспечивают в сплавах на основе WC благоприятное сочетание твердости и трещиностойкости. В работе [9] установлено, что связка NiFeCrWMo существенно ограничивает рост зерен WC, что связывают с эффектом замедленной диффузии и образованием на границах WC/ВЭС небольшого количества сложного карбида. Исследования легирования твердых сплавов ведутся и в Узбекистане [1].

Ключевым этапом получения ВЭС-связки является механическое легирование (МЛ), продолжительность которого определяет размер частиц, степень агломерации, размер кристаллитов и накопленную микродеформацию порошка [10]. Для последующей консолидации эффективно искровое плазменное спекание (ИПС), позволяющее получать плотные твердые сплавы при коротком времени выдержки и ограниченном росте зерен [3]. Однако взаимосвязь продолжительности МЛ со структурными параметрами порошков и степенью уплотнения сплавов WC с ВЭС-связкой Fe–Cr–Ni–W–Mo изучена недостаточно [2].

Цель работы – установить влияние продолжительности механического легирования на морфологию, кристаллическую структуру композиционных порошков WC–FeCrNiWMo и плотность сплава WC–6FeCrNiWMo, полученного искровым плазменным спеканием. Для достижения цели решались следующие задачи: термодинамически обосновать выбор системы Fe–Cr–Ni–W–Mo; определить зависимость размера частиц, размера кристаллитов и микродеформации от времени МЛ; исследовать микроструктуру и распределение элементов после ИПС; оценить плотность и пористость сплава в сравнении с WC–6Co.

Материалы и методы исследования

В качестве твердой фазы использовали порошок WC чистотой более 99 % со средним размером частиц 4–6 мкм. Связку получали из порошков Fe, Cr, Ni, W и Mo чистотой более 99 % и крупностью менее 45 мкм, взятых в эквиатомном соотношении (по 20 ат.%), что соответствует массовым долям Fe – 12,51 %, Cr – 11,65 %, Ni – 13,15 %, W – 41,19 % и Mo – 21,50 %. Исследуемый сплав содержал 94 масс.% WC и 6 масс.% ВЭС (далее WC–6FeCrNiWMo); образцом сравнения служил сплав WC–6Co того же содержания связки.

Выбор системы Fe–Cr–Ni–W–Mo оценивали по общепринятым критериям образования твердых растворов в ВЭС: энтропии смешения ΔS_{mix}, энтальпии смешения ΔH_{mix}, параметру размерного несоответствия атомов δ, параметру Ω и концентрации валентных электронов VEC [6; 13; 15]:

$$\Delta S_{mix} = -R\sum_{i=1}^{n} c_i \ln c_i, \quad \Delta H_{mix} = \sum_{i<j} 4\Delta H_{ij} c_i c_j, \tag{1}$$

$$\delta = 100\sqrt{\sum_{i=1}^{n} c_i(1 - r_i/\bar{r})^2}, \quad \Omega = \frac{T_m \Delta S_{mix}}{|\Delta H_{mix}|}, \tag{2}$$

где R – универсальная газовая постоянная; c_i, c_j – атомные доли компонентов; ΔH_{ij} – энтальпия смешения бинарных пар по данным [13]; r_i – атомный радиус i-го элемента; $\bar{r}$ – средний радиус; T_m – средняя температура плавления компонентов. Результаты расчета приведены в таблице 1.

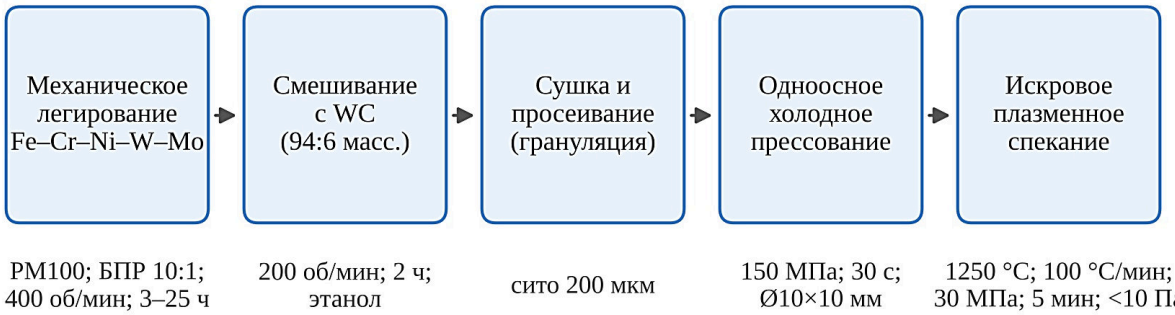
Таблица 1. Термодинамические параметры ВЭС Fe–Cr–Ni–W–Mo

Параметр	Значение	Критерий / интерпретация
ΔS_{mix}, Дж/(моль·К)	13,38	R·ln5 для эквиатомного пятикомпонентного сплава
ΔH_{mix}, кДж/моль	−3,36	малое по модулю отрицательное значение благоприятно для твердого раствора [13; 15]
δ, %	5,18	$\delta \le 6{,}6$ % – благоприятно для твердого раствора [15]
Ω	≈ 9,8	$\Omega \ge 1{,}1$ – энтропийная стабилизация твердого раствора [15]
VEC	7,2	$6{,}87 \le VEC < 8$ – вероятно сосуществование ОЦК и ГЦК фаз [6]

Таким образом, по совокупности критериев система Fe–Cr–Ni–W–Mo склонна к образованию многокомпонентных твердых растворов, однако расчетные параметры не определяют фазовый состав однозначно, и он должен уточняться экспериментально.

Технологическая схема получения сплава показана на рисунке 1, режимы – в таблице 2. МЛ проводили в планетарной мельнице Retsch PM100 в размольных стаканах и шарами (Ø10 мм) из сплава WC–Co при соотношении масс шаров и порошка (БПР) 10:1 и частоте вращения 400 об/мин; в качестве поверхностно-активной добавки вводили бензин (16 мл на 100 г порошка). Для оценки влияния длительности обработки время МЛ композиционных порошков WC–FeCrNiWMo варьировали от 3 до 25 ч. Смешивание с WC выполняли в той же

мельнице при 200 об/мин в течение 2 ч в среде этанола, что исключало избыточное измельчение карбида. В качестве временного технологического связующего использовали синтетический каучук, удаляемый при нагреве.



Контроль: СЭМ/ImageJ, РФА (Scherrer, Williamson–Hall), СЭМ-ЭДС, плотность по Архимеду

Рисунок 1. Технологическая схема получения твердого сплава WC–6FeCrNiWMo

Таблица 2. Технологические режимы получения сплава WC–6FeCrNiWMo

Операция	Режим
Механическое легирование	Retsch PM100; стакан и шары WC–Co, Ø10 мм; БПР 10:1; 400 об/мин; 3–25 ч; бензин 16 мл/100 г
Смешивание с WC	94 масс.% WC + 6 масс.% ВЭС; 200 об/мин; 2 ч; этанол
Гранулометрическое разделение	сито с ячейкой 200 мкм
Холодное одноосное прессование	150 МПа; выдержка 30 с; цилиндры Ø10 × 10 мм; пористость прессовок 38–40 %
Искровое плазменное спекание	СПС-20Т10КА; графитовая матрица; 1250 °C; 100 °C/мин; до 30 МПа (ступенчато); выдержка 5 мин; вакуум < 10 Па; охлаждение под давлением

Морфологию порошков и микроструктуру спеченных образцов исследовали на сканирующем электронном микроскопе REM-106U в режимах вторичных (SE) и отраженных (BSE) электронов; средний размер частиц определяли обработкой СЭМ-изображений в программе ImageJ. Элементный состав и распределение элементов изучали энергодисперсионным спектрометром Oxford INCA Wave 500 (картирование и точечный анализ). Рентгенофазовый анализ (РФА) выполняли на дифрактометре Rigaku Ultima IV в CuKα-излучении (λ = 1,5406 Å) при 30 кВ и 15 мА. Средний размер кристаллитов D оценивали по уравнению Шеррера, разделение вкладов размера кристаллитов и микродеформации ε проводили методом Уильямсона–Холла:

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta}, \quad \beta \cos \theta = \frac{K\lambda}{D} + 4\varepsilon \sin \theta, \tag{3}$$

где K = 0,9 – постоянная Шеррера; β – ширина рефлекса на половине высоты (FWHM) за вычетом инструментального уширения, рад; θ – брэгговский угол.

Плотность спеченных образцов $\rho_{эксп}$ определяли методом гидростатического взвешивания в дистиллированной воде при 20 °C. Теоретическую плотность рассчитывали по правилу смесей при ρ_{WC} = 15,63 г/см^3, ρ_{Co} = 8,90 г/см^3 и $\rho_{ВЭС}$ = 11,20 г/см^3; относительную плотность $\rho_{отн}$ и общую пористость П находили по формулам:

$$\frac{1}{\rho_{теор}} = \frac{w_{WC}}{\rho_{WC}} + \frac{w_{св}}{\rho_{св}}, \quad \rho_{отн} = \frac{\rho_{эксп}}{\rho_{теор}} \cdot 100\ \%, \quad П = 100 - \rho_{отн}, \qquad (4)$$

где w_{WC}, $w_{св}$ – массовые доли WC и связки. Теоретическая плотность составила 15,27 г/см^3 для WC–6FeCrNiWMo и 14,95 г/см^3 для WC–6Co. Результаты представлены в виде среднего значения ± стандартное отклонение ($\bar{x}$ ± SD); обработку данных выполняли в Microsoft Excel 2021 и OriginPro 2024.

Результаты и обсуждение

Морфология и размер частиц. Изменение среднего размера частиц композиционного порошка в зависимости от продолжительности МЛ приведено в таблице 3. На начальной стадии (3 ч) преобладает холодная сварка частиц, что приводит к образованию крупных пластинчатых агломератов неправильной формы со средним размером 18,6 ± 2,8 мкм. При 6–9 ч многократные соударения шаров вызывают разрушение агломератов, и размер частиц снижается до 13,2 ± 2,1 и 8,9 ± 1,5 мкм соответственно. После 12 ч морфология порошка становится более однородной, а после 20 ч формируются мелкие равноосные частицы размером 4,5 ± 0,9 мкм. Таким образом, при увеличении времени МЛ с 3 до 20 ч средний размер частиц уменьшается на 75,8 %.

Таблица 3. Влияние продолжительности МЛ на средний размер частиц порошка WC–FeCrNiWMo

Время МЛ, ч	Средний размер частиц d, мкм	Морфология
3	18,6 ± 2,8	крупные пластинчатые агломераты неправильной формы
6	13,2 ± 2,1	разрушение агломератов
9	8,9 ± 1,5	мелкие, относительно однородные частицы
12	6,3 ± 1,2	относительно гомогенная морфология
20	4,5 ± 0,9	очень мелкие однородные частицы
22	4,6–4,7 ± 0,9	насыщение измельчения (плато)
25	4,6–4,9 ± 0,9	повторная агломерация мелких частиц
WC–6Co (сравнение)	6,4 ± 1,6	мелкие частицы, более крупные агломераты

Дальнейшее увеличение времени до 22–25 ч не приводит к заметному измельчению; при 25 ч отмечено даже некоторое укрупнение частиц вследствие повторной агломерации. Это указывает на установление динамического равновесия между процессами разрушения и холодной сварки частиц вблизи 20 ч МЛ, что согласуется с закономерностями, описанными

для механически легированных ВЭС [10]. Порошок WC–6FeCrNiWMo после 20 ч МЛ мельче и однороднее порошка сравнения WC–6Co (6,4 ± 1,6 мкм), что создает более благоприятные условия для последующего спекания. Поэтому режим 20 ч был принят в качестве рабочего.

Кристаллическая структура. Результаты РФА приведены в таблице 4 и на рисунке 2. С увеличением продолжительности МЛ интенсивность дифракционных максимумов WC снижается, а сами максимумы уширяются: FWHM основного рефлекса возрастает с 0,17° в исходном порошке до 0,56° после 20 ч обработки, а его положение смещается с 2θ = 35,61° до 35,48°. Смещение рефлекса свидетельствует об искажении кристаллической решетки и изменении уровня внутренних напряжений.

Таблица 4. Влияние продолжительности МЛ на параметры кристаллической структуры WC в порошке WC–FeCrNiWMo

Время МЛ, ч	2θ, °	FWHM, °	D (Шеррер), нм	D (У–Х), нм	ε (У–Х), %	R^2
0	35,61	0,17	48	50,3	0,65	0,972
3	35,59	0,22	37	38,7	0,98	0,986
6	35,56	0,28	30	31,6	1,26	0,981
9	35,54	0,35	24	25,4	1,58	0,984
12	35,51	0,43	20	21,2	1,86	0,987
20	35,48	0,56	15	16,1	2,03	0,989

Примечание: У–Х – метод Уильямсона–Холла; R^2 – коэффициент детерминации линейной аппроксимации βcosθ = f(4sinθ) по нескольким рефлексам.

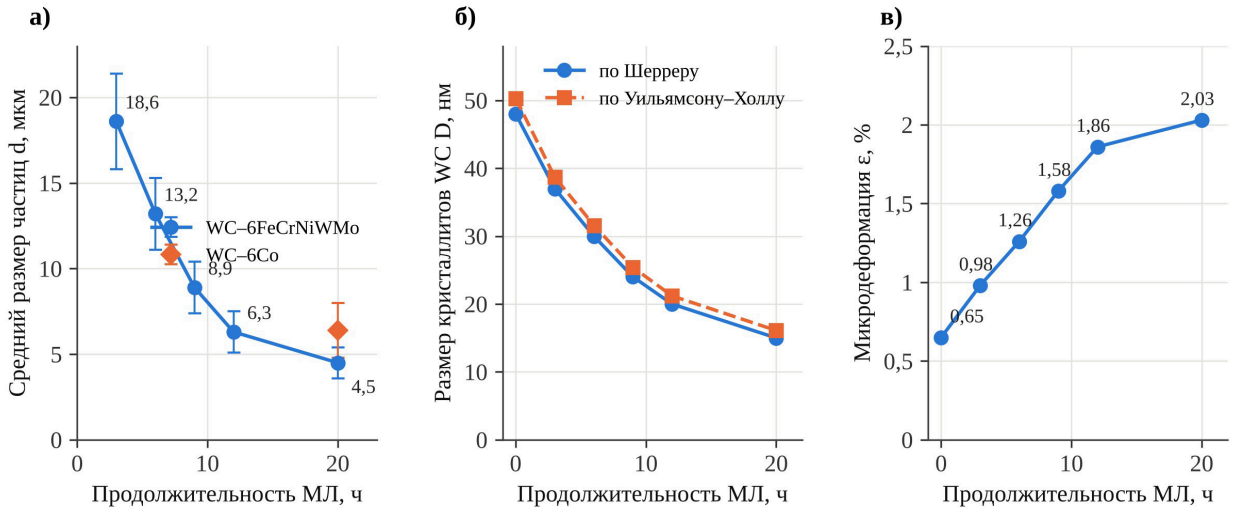


Рисунок 2. Зависимость среднего размера частиц (а), размера кристаллитов WC (б) и микродеформации решетки (в) от продолжительности МЛ

Размер кристаллитов, рассчитанный по уравнению Шеррера, уменьшается с 48 до 15 нм (на 68,8 %), а по методу Уильямсона–Холла – с 50,3 до 16,1 нм; оба метода дают согласующиеся результаты (рис. 2б). Одновременно микродеформация решетки возрастает с 0,65 до 2,03 % (рис. 2в). Следовательно, уширение рефлексов обусловлено как измельчением кристаллитов, так и накоплением дефектов кристаллического строения. Сопоставление данных СЭМ и РФА показывает, что МЛ действует на двух масштабных уровнях: на микроуровне уменьшается размер частиц (18,6 → 4,5 мкм), на наноуровне –

размер когерентно рассеивающих областей (48 → 15 нм). Порошок после 20 ч МЛ находится в высокодефектном состоянии с повышенной запасенной энергией, что является движущей силой уплотнения при спекании. После ИПС при 1250 °C рефлексы сужаются, а их интенсивность возрастает, что свидетельствует о частичной релаксации дефектов и внутренних напряжений, накопленных при МЛ.

Микроструктура и распределение элементов после ИПС. Микроструктура сплава WC–6FeCrNiWMo после 20 ч МЛ и ИПС при 1250 °C плотная: зерна WC равномерно распределены в связке, крупные и сообщающиеся поры практически отсутствуют (рис. 3). На картах ЭДС области повышенной интенсивности W и C совпадают и соответствуют зернам WC, тогда как Fe, Cr, Ni и Mo распределены преимущественно в прослойках между зернами; выраженных участков сегрегации не обнаружено. Это указывает на эффективное перемешивание компонентов при МЛ и их перераспределение в связке при спекании.

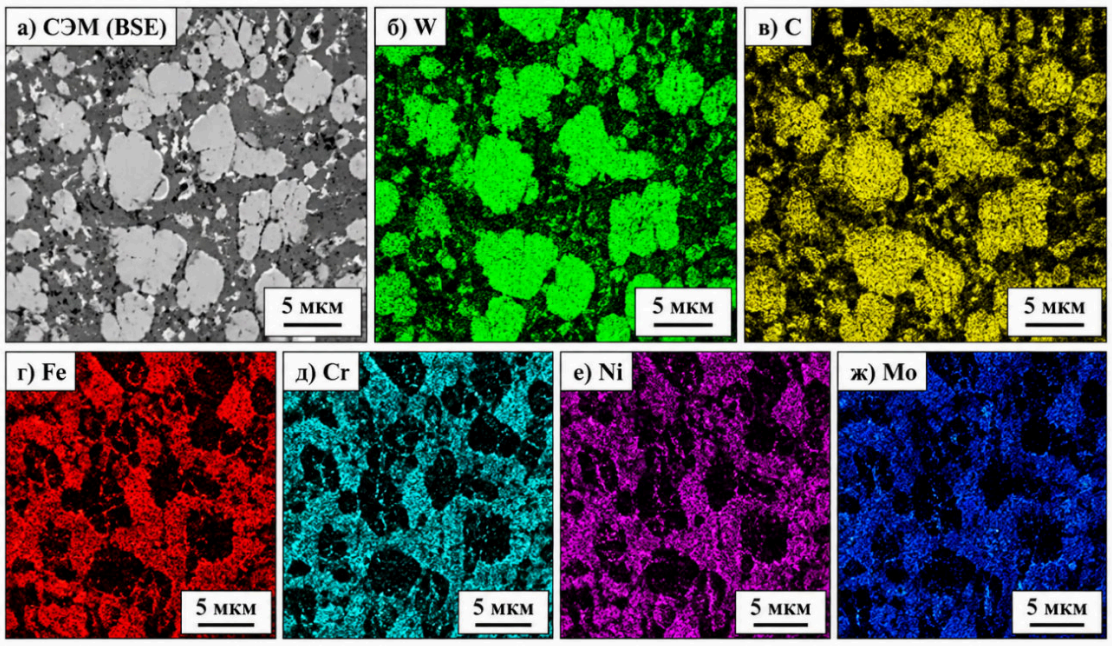


Рисунок 3. СЭМ-изображение (BSE) микроструктуры сплава WC–6FeCrNiWMo после ИПС при 1250 °C (а) и карты распределения W (б), C (в), Fe (г), Cr (д), Ni (е), Mo (ж)

Результаты точечного ЭДС-анализа (табл. 5) подтверждают различие состава структурных составляющих. В зерне WC суммарное содержание W и C составляет 90 ат.%, а доля Fe, Cr, Ni и Mo не превышает 4 ат.%. В связке, напротив, преобладают Fe, Cr, Ni и Mo (22–24 ат.% каждого), что подтверждает формирование многокомпонентной связки Fe–Cr–Ni–W–Mo. В зоне межфазной границы WC/ВЭС одновременно присутствуют все элементы, что свидетельствует о взаимной диффузии и наличии переходной зоны.

Таблица 5. Результаты точечного ЭДС-анализа сплава WC–6FeCrNiWMo после ИПС, ат. %

Область анализа	W	C	Fe	Cr	Ni	Mo
Зерно WC	45,0	45,0	1,5	1,0	1,0	0,5
Связка (ВЭС)	8,0	2,0	22,0	22,0	22,0	24,0
Граница WC/ВЭС	32,0	25,0	10,0	8,0	10,0	15,0

Следует учитывать, что точечный ЭДС-анализ имеет полуколичественный характер, а погрешность определения легкого элемента (углерода) существенно выше, чем тяжелых. Поэтому данные о составе переходной зоны не позволяют однозначно идентифицировать новую фазу. Полученная картина согласуется с результатами [9] для связки NiFeCrWMo, где ограничение роста зерен WC связано с замедленной диффузией в ВЭС и образованием на границах небольшого количества сложного карбида; при этом состав сплава, режимы МЛ и способ консолидации в настоящей работе отличаются. Состояние межфазных границ WC/связка, по данным [12], во многом определяет механические свойства твердых сплавов.

Плотность и пористость. Данные о плотности спеченных образцов приведены в таблице 6 и на рисунке 4. С увеличением времени МЛ с 3 до 20 ч экспериментальная плотность возрастает с 14,52 ± 0,06 до 14,91 ± 0,04 г/см^3, относительная плотность – с 95,09 ± 0,39 до 97,64 ± 0,26 %, а расчетная общая пористость снижается с 4,91 ± 0,39 до 2,36 ± 0,26 %. Сплав сравнения WC–6Co, полученный по аналогичной схеме, имеет относительную плотность 96,99 ± 0,40 % и пористость 3,01 ± 0,40 %.

Таблица 6. Плотность и пористость сплавов WC–6FeCrNiWMo и WC–6Co после ИПС

Образец	Время МЛ, ч	$\rho_{эксп}$, г/см^3	$\rho_{теор}$, г/см^3	$\rho_{отн}$, %	П, %
WC–6FeCrNiWMo	3	14,52 ± 0,06	15,27	95,09 ± 0,39	4,91 ± 0,39
WC–6FeCrNiWMo	6	14,63 ± 0,05	15,27	95,81 ± 0,33	4,19 ± 0,33
WC–6FeCrNiWMo	9	14,75 ± 0,05	15,27	96,59 ± 0,33	3,41 ± 0,33
WC–6FeCrNiWMo	12	14,84 ± 0,04	15,27	97,18 ± 0,26	2,82 ± 0,26
WC–6FeCrNiWMo	20	14,91 ± 0,04	15,27	97,64 ± 0,26	2,36 ± 0,26
WC–6Co	20	14,50 ± 0,06	14,95	96,99 ± 0,40	3,01 ± 0,40

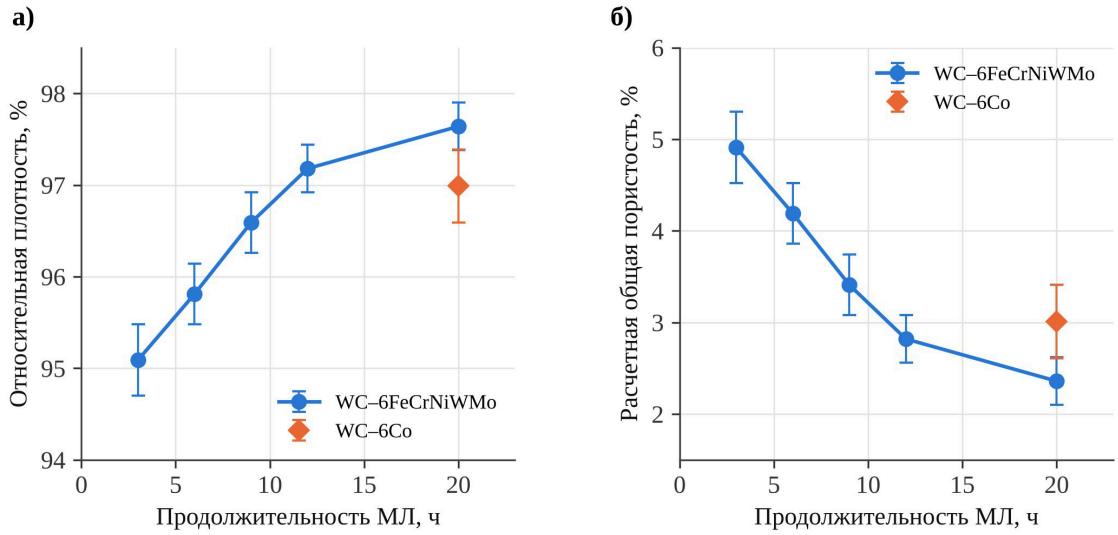


Рисунок 4. Влияние продолжительности МЛ на относительную плотность (а) и расчетную пористость (б) сплава WC–6FeCrNiWMo после ИПС

Рост плотности коррелирует с измельчением порошка: уменьшение размера частиц увеличивает удельную поверхность и число межчастичных контактов, что облегчает перегруппировку частиц и массоперенос при ИПС. Дополнительным фактором является высокая плотность дефектов и микродеформация, накопленные при МЛ, которые повышают

диффузионную активность порошка. Совместное действие температуры (1250 °C) и давления (30 МПа) при ИПС обеспечивает закрытие основной части остаточных пор, что согласуется с представлениями о кинетике искрового плазменного спекания твердых сплавов [3]. Достигнутый уровень плотности и равномерное распределение элементов связки создают предпосылки для повышения механических и эксплуатационных свойств сплава [4; 7].

Полученные результаты позволяют представить формирование структуры сплава WC–6FeCrNiWMo как последовательность взаимосвязанных стадий: МЛ → измельчение частиц и кристаллитов, накопление микродеформации → интенсификация уплотнения при ИПС → плотная микроструктура с равномерно распределенной многокомпонентной связкой.

Заключение

1. Расчет термодинамических параметров (ΔS_{mix} = 13,38 Дж/(моль·K), ΔH_{mix} = −3,36 кДж/моль, δ = 5,18 %, Ω ≈ 9,8, VEC = 7,2) показал, что эквиатомная система Fe–Cr–Ni–W–Mo удовлетворяет критериям образования многокомпонентных твердых растворов и может рассматриваться как альтернатива кобальтовой связке в твердых сплавах на основе WC.

2. При увеличении продолжительности МЛ с 3 до 20 ч средний размер частиц порошка WC–FeCrNiWMo уменьшается с 18,6 ± 2,8 до 4,5 ± 0,9 мкм (на 75,8 %), размер кристаллитов WC – с 48 до 15 нм, а микродеформация решетки возрастает до ≈2,0 %. При 22–25 ч измельчение прекращается и начинается повторная агломерация, поэтому рациональной продолжительностью МЛ является 20 ч.

3. ИПС при 1250 °C и 30 МПа порошка после 20 ч МЛ обеспечивает формирование плотной микроструктуры, в которой Fe, Cr, Ni и Mo равномерно распределены в связке между зернами WC, а на межфазных границах образуется переходная зона взаимной диффузии.

4. Относительная плотность сплава WC–6FeCrNiWMo возрастает с 95,09 до 97,64 % при увеличении времени МЛ с 3 до 20 ч и превышает плотность сплава сравнения WC–6Co (96,99 %), а пористость снижается до 2,36 %. Разработанные режимы рекомендуются для получения бескобальтовых твердых сплавов для режущих пластин.

Список литературы

1. Рузиев У.Н. [и др.] Легирование ванадием и рением твердых сплавов // Universum: химия и биология. – 2022. – № 10–2 (100). – С. 9–13.
2. Asadova M.A., Qayumov B.B., Bozorov A.N. Jo‘rayev D.D., Qudratov N.S. Qattiq qotishmalarning strukturaviy shakllanishiga mexanik legirlash davomiyligining ta’siri // Zarafshon mintaqasini kompleks innovatsion rivojlantirish: yutuqlar, muammolar va istiqbollar: материалы конф. – 2026. – P. 86–87.
3. Buravleva A.A. [et al.] Spark plasma sintering of WC-based 10wt%Co hard alloy: a study of sintering kinetics and solid-phase processes // Materials. – 2022. – T. 15, № 3. – Art. 1091. – DOI: 10.3390/ma15031091.
4. Fan C. [et al.] High entropy alloy bonded cemented carbides: composition, processing, microstructure, properties and applications // Ceramics International. – 2024. – T. 50, № 20. – P. 37460–37503.

5. García J., Collado Ciprés V., Blomqvist A., Kaplan B. Cemented carbide microstructures: a review // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2019. – T. 80. – P. 40–68.
6. Guo S., Ng C., Lu J., Liu C.T. Effect of valence electron concentration on stability of fcc or bcc phase in high entropy alloys // Journal of Applied Physics. – 2011. – T. 109, № 10. – Art. 103505. – DOI: 10.1063/1.3587228.
7. Katiyar P.K. [et al.] High entropy alloys (HEAs) as a binder material for heavy tungsten alloys, tungsten carbide hardmetals, and titanium carbo-nitride based cermet composites – a comprehensive review // Advances in Materials and Processing Technologies. – 2016. – T. 9, № 4. – P. 1979–2016.
8. Li K., Yang X., Shen S. [et al.] Research and prospect of novel WC-HEA cemented carbide // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2085. – T. 130. – P. 2085–2117. – DOI: 10.1007/s00170-023-12770-7.
9. Nakonechnyi S.O., Yurkova A.I., Loboda P.I. Structure and mechanical properties of WC-based hardmetal with a high-entropy NiFeCrWMo binder // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2024. – T. 62, № 9. – P. 555–571.
10. Olejarz A. [et al.] Microstructure and mechanical properties of mechanically-alloyed CoCrFeNi high-entropy alloys using low ball-to-powder ratio // Journal of Alloys and Compounds. – 2023. – T. 938. – Art. 168196. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2022.168196.
11. Qian C. [et al.] The effect of carbon content on the microstructure and mechanical properties of cemented carbides with a CoNiFeCr high entropy alloy binder // Materials. – 2022. – T. 15, № 16. – Art. 5780. – DOI: 10.3390/ma15165780.
12. Straumal B.B., Konyashin I. Faceting/roughening of WC/binder interfaces in cemented carbides: a review // Materials. – 2023. – T. 16, № 10. – Art. 3696. – DOI: 10.3390/ma16103696.
13. Takeuchi A., Inoue A. Classification of bulk metallic glasses by atomic size difference, heat of mixing and period of constituent elements and its application to characterization of the main alloying element // Materials Transactions. – 2005. – T. 46, № 12. – P. 2817–2829. – DOI: 10.2320/matertrans.46.2817.
14. Yadav S. [et al.] Role of binder phase on the microstructure and mechanical properties of a mechanically alloyed and spark plasma sintered WC-FCC HEA composites // Journal of Alloys and Compounds. – 2021. – T. 877. – Art. 160265.
15. Yang X., Zhang Y. Prediction of high-entropy stabilized solid-solution in multi-component alloys // Materials Chemistry and Physics. – 2012. – T. 132, № 2–3. – P. 233–238. – DOI: 10.1016/j.matchemphys.2011.11.021.

References

1. Ruziev U.N. et al. Legirovanie vanadiem i reniem tverdykh splavov [Alloying of hard alloys with vanadium and rhenium]. Universum: khimiya i biologiya. 2022. No. 10–2 (100). P. 9–13. (In Russ.).

2. Asadova M.A., Qayumov B.B., Bozorov A.N., Jo‘rayev D.D., Qudratov N.S. Qattiq qotishmalarning strukturaviy shakllanishiga mexanik legirlash davomiyligining ta’siri [Effect of mechanical alloying duration on the structural formation of hard alloys]. Zarafshon mintaqasini kompleks innovatsion rivojlantirish: yutuqlar, muammolar va istiqbollar [Integrated innovative development of the Zarafshan region: achievements, problems and prospects]. Navoi, 2026. P. 86–87. (In Uzbek).
3. Buravleva A.A. et al. Spark plasma sintering of WC-based 10wt%Co hard alloy: a study of sintering kinetics and solid-phase processes. Materials. 2022. Vol. 15, No. 3. Art. 1091. DOI: 10.3390/ma15031091.
4. Fan C. et al. High entropy alloy bonded cemented carbides: composition, processing, microstructure, properties and applications. Ceramics International. 2024. Vol. 50, No. 20. P. 37460–37503.
5. García J., Collado Ciprés V., Blomqvist A., Kaplan B. Cemented carbide microstructures: a review. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2019. Vol. 80. P. 40–68.
6. Guo S., Ng C., Lu J., Liu C.T. Effect of valence electron concentration on stability of fcc or bcc phase in high entropy alloys // Journal of Applied Physics. – 2011. – Vol. 109, No. 10. – Art. 103505. – DOI: 10.1063/1.3587228.
7. Katiyar P.K. et al. High entropy alloys (HEAs) as a binder material for heavy tungsten alloys, tungsten carbide hardmetals, and titanium carbo-nitride based cermet composites – a comprehensive review // Advances in Materials and Processing Technologies. – 2016. – Vol. 9, No. 4. – P. 1979–2016.
8. Li K., Yang X., Shen S. et al. Research and prospect of novel WC-HEA cemented carbide. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2024. Vol. 130. P. 2085–2117. DOI: 10.1007/s00170-023-12770-7.
9. Nakonechnyi S.O., Yurkova A.I., Loboda P.I. Structure and mechanical properties of WC-based hardmetal with a high-entropy NiFeCrWMo binder. Powder Metallurgy and Metal Ceramics. 2024. Vol. 62, No. 9. P. 555–571.
10. Olejarz A. et al. Microstructure and mechanical properties of mechanically-alloyed CoCrFeNi high-entropy alloys using low ball-to-powder ratio // Journal of Alloys and Compounds. – 2023. – Vol. 938. – Art. 168196. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2022.168196.
11. Qian C. et al. The effect of carbon content on the microstructure and mechanical properties of cemented carbides with a CoNiFeCr high entropy alloy binder. Materials. 2022. Vol. 15, No. 16. Art. 5780. DOI: 10.3390/ma15165780.
12. Straumal B.B., Konyashin I. Faceting/roughening of WC/binder interfaces in cemented carbides: a review. Materials. 2023. Vol. 16, No. 10. Art. 3696. DOI: 10.3390/ma16103696.
13. Takeuchi A., Inoue A. Classification of bulk metallic glasses by atomic size difference, heat of mixing and period of constituent elements and its application to characterization of the main alloying element. Materials Transactions. 2005. Vol. 46, No. 12. P. 2817–2829. DOI: 10.2320/matertrans.46.2817.

14. Yadav S. et al. Role of binder phase on the microstructure and mechanical properties of a mechanically alloyed and spark plasma sintered WC-FCC HEA composites // Journal of Alloys and Compounds. – 2021. – Vol. 877. – Art. 160265.
15. Yang X., Zhang Y. Prediction of high-entropy stabilized solid-solution in multi-component alloys. Materials Chemistry and Physics. 2012. Vol. 132, No. 2–3. P. 233–238. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2011.11.021.

Статья поступила в редакцию: 04.11.2026
Статья принята к публикации: 20.11.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 622.7

DOI: 10.32743/UniTech.2026.152.11.23769

Контейнерный модуль для доизвлечения золота из лежалых хвостов Тырнаузского месторождения: технологическое обоснование и материальный баланс

Бекбулатов Амир Дамирович
аспирант
Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
Российская Федерация, г. Москва
E-mail: m2514403@edu.misis.ru

Куренков Дмитрий Сергеевич
канд. техн. наук, доц.
кафедры геологии и маркшейдерского дела Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
Российская Федерация, г. Москва
E-mail: kurenkov@misis.ru

Container module for additional gold recovery from legacy tailings of the Tyrnyauz deposit: technological justification and material balance

Bekbulatov Amir
postgraduate Student
National University of Science and Technology MISIS
Russia, Moscow

Kurenkov Dmitry Sergeyevich
candidate of Technical Sciences (PhD in Engineering)
Associate Professor at the Department of Geology and Mine Surveying National University of Science and Technology «MISIS»
Russia, Moscow

Аннотация

В статье рассмотрена технология переработки лежалых хвостов Тырнаузского месторождения с использованием контейнерного модуля. Актуальность исследования обусловлена необходимостью вовлечения в переработку техногенных накоплений, содержащих остаточные количества благородных металлов, а также стремлением снизить капитальные затраты за счёт мобильной и компактной схемы размещения оборудования. Показано, что контейнерный модуль позволяет организовать опытно-промышленную

Библиографическое описание: Бекбулатов А.Д., Куренков Д.С. Контейнерный модуль для доизвлечения золота из лежалых хвостов Тырнаузского месторождения: технологическое обоснование и материальный баланс // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23769

переработку вблизи места складирования хвостов, упростить транспортную логистику и обеспечить поэтапное наращивание мощности. Обоснована комбинированная схема, включающая приём и подготовку сырья, гравитационное извлечение золота, дообогащение концентрата и обращение с отвальными хвостами. Выполнен укрупнённый расчёт материального баланса для производительности 1000 т/сут при содержании золота 0,8 г/т. При выходе гравитационного концентрата 1,5 % и извлечении 55 % получено 0,4395 кг золота в концентрате в сутки. Низкая невязка баланса (около 0,01 %) подтверждает корректность расчётной схемы. Полученные результаты подтверждают технологическую реализуемость предложенного решения и его пригодность для пилотной апробации. Практическая значимость заключается в возможности снижения экологической нагрузки и вовлечения техногенного сырья в хозяйственный оборот при минимальных капитальных затратах.

Abstract

The article considers the technology for processing legacy tailings of the Tyrnyauz deposit using a container module. The relevance of the study is driven by the need to involve technogenic accumulations containing residual amounts of precious metals in processing, as well as the desire to reduce capital costs through a mobile and compact equipment layout. It is shown that the container module makes it possible to organize pilot-industrial processing near the tailing’s storage site, simplify transport logistics and ensure phased capacity expansion. A combined flowsheet is justified, including feed reception and preparation, gravity gold recovery, concentrate cleaning and handling of final tailings. An enlarged material balance calculation was performed for a throughput of 1000 t/day at a gold grade of 0.8 g/t. With a gravity concentrate yield of 1.5 % and recovery of 55 %, 0.4395 kg of gold per day is obtained in the concentrate. The low balance discrepancy (about 0.01 %) confirms the correctness of the calculation scheme. The results obtained confirm the technological feasibility of the proposed solution and its suitability for pilot testing. The practical significance lies in the possibility of reducing the environmental load and involving technogenic raw materials in economic turnover at minimal capital costs.

Ключевые слова: лежалые хвосты, золото, контейнерный модуль, Тырнаузское месторождение, технологическая схема, гравитационное обогащение, материальный баланс, техногенное сырьё.

Keywords: legacy tailings, gold, container module, Tyrnyauz deposit, flowsheet, gravity concentration, material balance, technogenic raw materials.

Финансирование: исследование выполнено без внешнего финансирования.
Funding: The study received no external funding.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.
Conflict of interest: The author declares no conflict of interest.

Введение

Переработка лежалых хвостов обогащения представляет собой одно из наиболее востребованных направлений современного техногенного недропользования. Рост объёмов хвостохранилищ, ограниченность минерально-сырьевой базы и необходимость снижения экологической нагрузки делают повторную переработку отходов не только ресурсосберегающей, но и экологически значимой задачей. Для Тырнаузского месторождения проблема особенно актуальна, поскольку в пределах рудного узла накоплены значительные массы техногенного сырья, длительное время воздействующего на окружающую среду и потенциально содержащего остаточные ценные компоненты [16, 19].

Постановка проблемы связана с тем, что лежалые хвосты характеризуются неоднородностью гранулометрического и вещественного состава, изменчивостью распределения благородных металлов по площади складирования и наличием трудноизвлекаемых форм золота. В результате прямое вовлечение таких материалов в переработку без предварительной технологической подготовки часто оказывается неэффективным. Следовательно, требуется компактная, адаптивная и экономически оправданная схема переработки, способная обеспечить устойчивое доизвлечение золота в условиях локального техногенного объекта [6, 10, 20].

Одним из перспективных решений является контейнерный модуль, позволяющий разместить технологическую линию в виде мобильного и быстро монтируемого комплекса. Такой подход особенно удобен для опытно-промышленной переработки, поскольку снижает капитальные затраты, упрощает логистику и даёт возможность поэтапно изменять состав оборудования в зависимости от свойств сырья. В случае Тырнаузского месторождения это важно ещё и потому, что объект расположен в зоне, где вопросы экологической безопасности и рационального обращения с отходами имеют первостепенное значение.

Литературный обзор показывает, что в последние годы значительное внимание уделяется трём направлениям: переработке исторических хвостов, применению модульных и мобильных фабрик и подбору предобработки перед выщелачиванием [6, 10, 20]. В частности, работа по модульной золотоизвлекательной фабрике Auplata демонстрирует практичность мобильной схемы для переработки хвостов исторической добычи, а исследования по сложным историческим хвостам подчёркивают значение формы нахождения золота и необходимости предварительной технологической подготовки. Для золотоносных хвостов наиболее часто рассматриваются гравитационные, флотационные и гидрометаллургические технологии, причём выбор схемы определяется минералогией исходного сырья и экономическими ограничениями конкретного проекта. Вместе с тем для локальных техногенных объектов с ограниченной инфраструктурой именно контейнерный формат переработки представляет наибольший практический интерес.

Целью настоящей работы является обоснование технологической схемы контейнерного модуля для доизвлечения золота из лежалых хвостов Тырнаузского месторождения и выполнение укрупнённого материального расчёта.

Для достижения цели решались следующие задачи: проанализировать актуальность переработки лежалых хвостов Тырнаузского месторождения; выполнить краткий обзор литературных источников по переработке техногенных хвостов и модульных установок; обосновать состав технологической схемы контейнерного модуля; рассчитать материальный баланс процесса; оценить технологическую эффективность предлагаемого решения.

Материалы и методы

Объектом исследования служат лежалые хвосты Тырнаузского месторождения, сформированные в результате длительной эксплуатации обогатительных переделов. Для подобных техногенных материалов характерны неоднородный гранулометрический состав, присутствие тонких классов, перераспределение ценных компонентов по объёму хвостохранилища и возможное наличие трудноизвлекаемых форм золота. Это обусловливает необходимость предварительной минералогической оценки и технологического опробования перед выбором схемы переработки.

В укрупнённом расчёте приняты следующие исходные параметры: производительность по исходным хвостам Q = 1000 т/сут; содержание золота в исходном сырье α = 0,8 г/т; массовый выход гравитационного концентрата γ = 1,5 %; содержание золота в концентрате α_k = 29,3 г/т; извлечение золота на гравитационной стадии ε_1 = 55 %.

Метод расчёта основан на уравнениях материального баланса и баланса металла для двухпродуктовой схемы:

$$Q = Q_k + Q_x, \quad (1)$$

$$Q \cdot \alpha = Q_k \cdot \alpha_k + Q_x \cdot \alpha_x, \quad (2)$$

где Q, Q_k, Q_x — массы исходного питания, концентрата и хвостов, т/сут; α, α_k, α_x — содержания золота в соответствующих продуктах, г/т.

Масса золота в потоке определялась по формуле:

$$M = Q \cdot \alpha / 1000, \quad (3)$$

где M — масса золота, кг/сут; Q — масса питания, т/сут; α — содержание золота, г/т.

Извлечение рассчитывалось как:

$$\varepsilon = (M_k / M) \cdot 100\ \%. \quad (4)$$

Результаты и обсуждение

Для контейнерного исполнения рациональна схема, включающая: приём и усреднение исходных хвостов; дезинтеграцию и классификацию; гравитационное извлечение золота; дообогащение концентрата; обезвоживание продуктов; оборотное водоснабжение; складирование отвальных хвостов (рис. 1). Гравитационная стадия выбрана как базовая, поскольку она компактна, энергоэффективна и хорошо вписывается в мобильные и модульные установки. Исследования по переработке старых хвостов показывают, что предварительное выделение богатых фракций часто является наиболее рациональным

способом снижения объёма последующего химического передела. Для Тырнауза это особенно важно, так как задача первого этапа — не максимизация технологической сложности, а устойчивое извлечение доступной части золота.

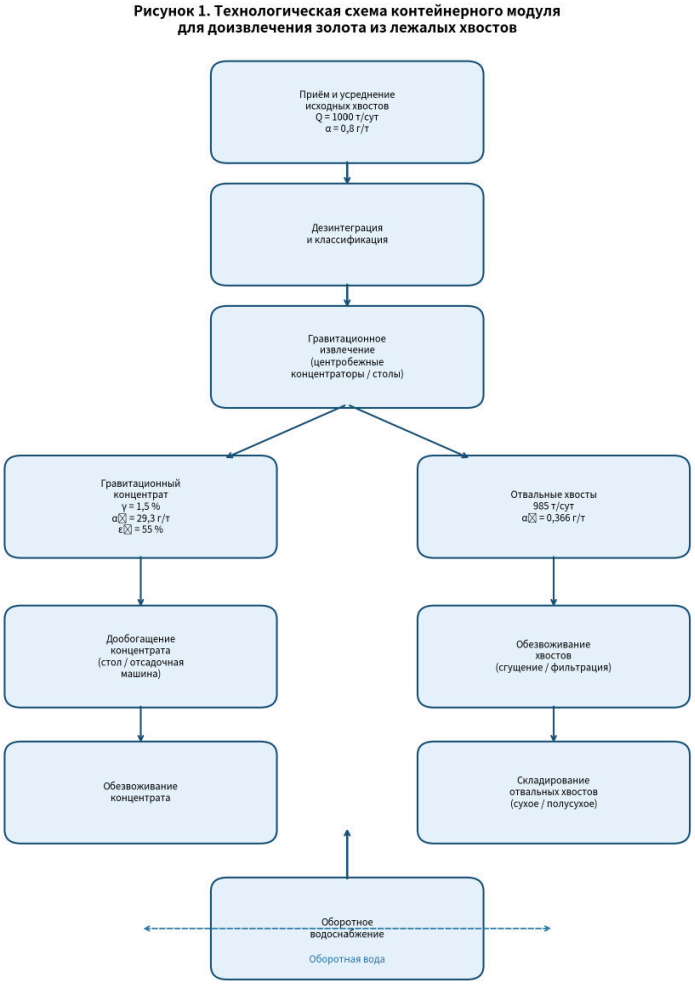


Рисунок 1. Технологическая схема контейнерного модуля для доизвлечения золота из лежалых хвостов

При Q = 1000 т/сут и α = 0,8 г/т масса золота в питании составляет:

$$M = 1000 \cdot 0{,}8 / 1000 = 0{,}800 \text{ кг/сут.} \quad (5)$$

При γ = 1,5 % масса концентрата равна:

$$Q_k = 1000 \cdot 0{,}015 = 15 \text{ т/сут.} \quad (6)$$

При α_k = 29,3 г/т масса золота в концентрате составляет:

$$M_k = 15 \cdot 29{,}3 / 1000 = 0{,}4395 \text{ кг/сут.} \quad (7)$$

Тогда извлечение в концентрат составляет:

$$\varepsilon_1 = (0{,}4395 / 0{,}800) \cdot 100\ \% = 54{,}94\ \% \approx 55\ \%. \quad (8)$$

Масса хвостов:

$$Q_х = 1000 - 15 = 985 \text{ т/сут.} \quad (9)$$

Масса золота в хвостах:

$$M_х = 0{,}800 - 0{,}4395 = 0{,}3605 \text{ кг/сут.} \quad (10)$$

Содержание золота в хвостах:

$$\alpha_х = 0{,}3605 \cdot 1000 / 985 \approx 0{,}366 \text{ г/т.} \quad (11)$$

Проверка баланса по металлу: 1000 · 0,8 = 800 г/сут; 15 · 29,3 + 985 · 0,366 ≈ 439,5 + 360,5 = 800 г/сут. Невязка составляет менее 0,01 %, что подтверждает корректность укрупнённого расчёта.

Таблица 1. Укрупнённый материальный баланс контейнерного модуля

Продукт	Выход, %	Масса, т/сут	Содержание Au, г/т	Масса Au, кг/сут	Извлечение, %
Исходные хвосты	100,0	1000	0,80	0,800	100,0
Гравитационный концентрат	1,5	15	29,3	0,4395	54,94
Отвальные хвосты	98,5	985	0,366	0,3605	45,06

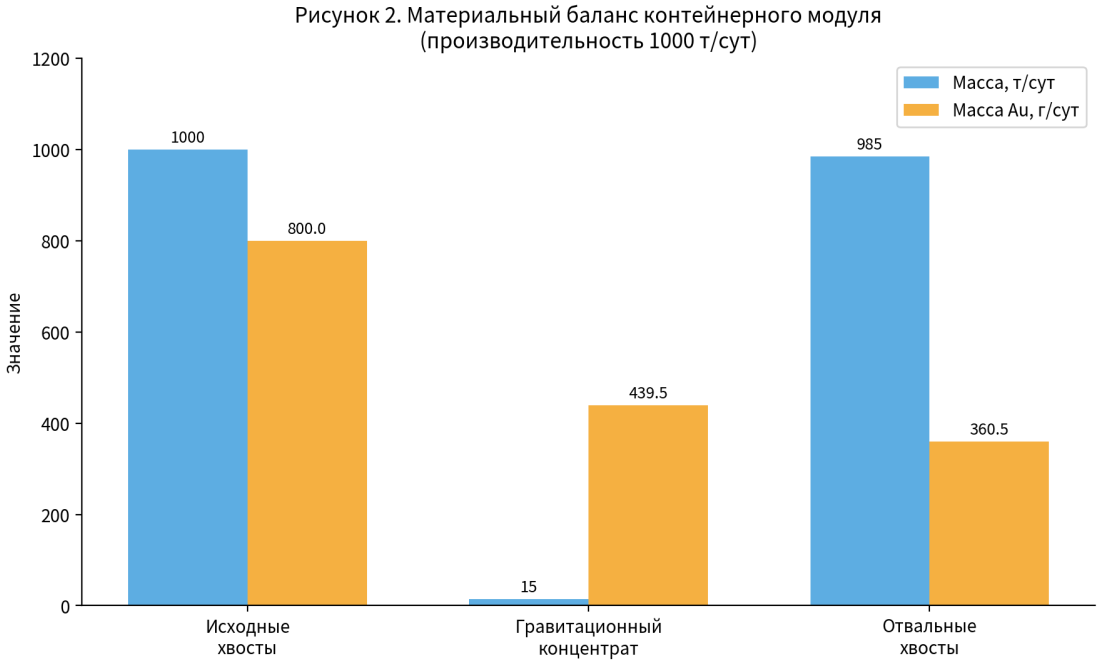


Рисунок 2. Материальный баланс контейнерного модуля (производительность 1000 т/сут)

Рисунок 3. Распределение золота на гравитационной стадии

Полученные результаты показывают, что даже при сравнительно низком содержании золота в техногенном сырье контейнерный модуль способен обеспечить заметный технологический эффект [6, 10, 20]. Преимущество контейнерного формата заключается в компактности, быстром монтаже и возможности адаптации схемы под особенности сырья. Это особенно важно для Тырнауза, где характеристики хвостов могут изменяться по площади и глубине складирования. При необходимости в схему можно включить доизмельчение, флотацию или химическое выщелачивание, однако для первого этапа рационально ограничиться гравитационным выделением и дообогащением концентрата.

Перспективным направлением развития контейнерного модуля является интеграция элементов «зелёного» сухого (или полусухого) складирования отвальных хвостов с обезвоживанием до высокой доли твёрдого, а также систем мониторинга в реальном времени. Подобные подходы, успешно применяемые при управлении красным шламом и другими техногенными отходами в условиях тропического климата, позволяют существенно снизить риск прорыва хранилищ, потребление воды и экологический след [8, 11, 13]. Для условий Тырнауза адаптация технологий сухого складирования и интеллектуального контроля геомеханического состояния отвалов повысит экологическую безопасность опытно-промышленной переработки и создаст предпосылки для последующего масштабирования.

Заключение

Проведённое исследование показало, что лежалые хвосты Тырнаузского месторождения могут рассматриваться как перспективное техногенное сырьё для повторной переработки, поскольку содержат остаточные количества золота и представляют интерес с точки зрения ресурсосбережения и снижения экологической нагрузки. Анализ литературы подтвердил, что для подобных объектов наиболее эффективны компактные модульные схемы, ориентированные на предварительное выделение доступной части металла.

Обоснован контейнерный модуль, включающий приём и усреднение хвостов, дезинтеграцию, классификацию, гравитационное извлечение золота, дообогащение концентрата и обезвоживание продуктов. Такой подход обеспечивает мобильность, сокращение капитальных затрат и возможность поэтапного наращивания мощности при опытно-промышленной апробации.

Укрупнённый материальный расчёт показал, что при производительности 1000 т/сут и содержании золота 0,8 г/т в исходном сырье возможно получение около 0,4395 кг золота в концентрате в сутки при извлечении порядка 55 % на первой стадии. Низкая невязка баланса подтверждает корректность расчётной схемы и технологическую реализуемость предложенного решения.

Таким образом, контейнерный модуль является целесообразной основой для доизвлечения золота из лежалых хвостов Тырнаузского месторождения. Полученные результаты могут быть использованы при разработке опытно-промышленной установки и технико-экономического обоснования проекта. Дальнейшее развитие модуля целесообразно связывать с внедрением элементов сухого складирования отвальных продуктов и систем мониторинга, что повысит экологическую безопасность и устойчивость технологии.

Список литературы

1. Борисов Р.В., Брагин В.И., Жижаев А.М., Лихацкий М.Н. Особенности формирования вторичной золотой минерализации в лежалых хвостах ЗИФ // Обогащение руд. – 2022. – № 2. – С. 29–36. – DOI: 10.17580/or.2022.02.05.
2. Лавриненко А.А., Иванова Т.А. Формы нахождения тонкодисперсного золота в хвостах флотации // Обогащение руд. – 2019. – № 5. – С. 22–27. – DOI: 10.17580/or.2019.05.04.
3. Прохоров К.В., Злобин М.Н. Комбинированная технология переработки хвостов обогащения // Цветные металлы. – 2021. – № 8. – С. 23–29. – DOI: 10.17580/tsm.2021.08.03.
4. Чантурия В.А., Козлов А.П. Актуальные проблемы техногенных месторождений // Горный журнал. – 2014. – № 7. – С. 45–50.
5. A practical guide to re-treatment of gold processing residues // Minerals Engineering. – 2005. – DOI: 10.1016/S0892-6875(05)00131-7.
6. A review of circular economy strategies for mine tailings // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2024. – DOI: 10.1016/j.jece.2024.113118.
7. Cacciuttolo C. et al. Dry Stacking of Filtered Tailings for Large-Scale Production Rates over 100,000 Metric Tons per Day // Minerals. – 2023. – Т. 13, № 11. – DOI: 10.3390/min13111385.
8. Celep O., Yazici E.Y. An innovative process for the recovery of gold from tailings // Journal of Cleaner Production. – 2020. – Т. 254. – Art. 120087. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120087.
9. Characterization of Gold in Complex Historical Refractory Tailings for Enhanced Process Optimization // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. – 2023. – DOI: 10.1080/08827508.2023.2298728.

10. Davies, M. Filtered dry stacked tailings – the fundamentals / M. Davies // Proceedings of the Tailings and Mine Waste Conference. – Vancouver: University of British Columbia, 2011. – P. 1–9.
11. Flotation of wolfram-molybdenum sand tailings at Tyrnyauz processing plant // Gornyi Zhurnal. – 2015. – DOI: 10.17580/gzh.2015.09.14.
12. Global Industry Standard on Tailings Management (GISTM). International Council on Mining and Metals (ICMM), UNEP, PRI, 2020 (с обновлениями 2023–2025). – International Council on Mining and Metals (ICMM), UNEP, PRI, 2025.
13. Historical assessment of metal recovery potential from old mine tailings // Waste Management. – 2018. – DOI: 10.1016/j.wasman.2018.05.044.
14. Kossoff D., Dubbin W.E., Alfredsson M. Mine tailings dams: characteristics, failure, environmental impacts, and remediation // Applied Geochemistry. – 2014. – T. 51. – P. 229–245. – DOI: 10.1016/j.apgeochem.2014.09.010.
15. Long-term impact of the Tyrnyauz tungsten-molybdenum mining and processing factory waste on environmental pollution and children's population // Environmental Geochemistry and Health. – 2022. – DOI: 10.1007/s10653-022-01221-z.
16. Recovering gold from mine tailings: a selection of reactors for bio-oxidation at high pulp densities // Journal of Chemical Technology & Biotechnology. – 2021. – DOI: 10.1002/jctb.6530.
17. Small Scale Relocatable Modular Gold Processing Plant [Электронный ресурс]. URL: http://hz-mineralprocessing.com/3-1-small-scale-modular-gold-processing-plant.html (дата обращения: 01.11.2026).
18. Tailing dumps of the Tyrnyauz tungsten–molybdenum mining and processing complex: Current state and outlooks [Электронный ресурс]. // Global Journal of Ecology. URL: https://www.agriscigroup.us/articles/GJE-5-125.php (дата обращения: 01.11.2026).
19. The Auplata modular gold recovery plant [Электронный ресурс]. // Proceedings World Gold. – 2019. URL: https://www.ausimm.com/publications/conference-proceedings/world-gold-2019/the-auplata-modular-gold-recovery-plant/ (дата обращения: 01.11.2026).

References

1. Borisov R.V., Bragin V.I., Zhizhaev A.M., Likhatskii M.N. Osobennosti formirovaniya vtorichnoi zolotoi mineralizatsii v lezhalykh khvostakh ZIF [Features of the formation of secondary gold mineralization in legacy tailings of gold recovery plants]. Obogashchenie rud. 2022. No. 2. P. 29–36. DOI: 10.17580/or.2022.02.05. (In Russ.).
2. Lavrinenko A.A., Ivanova T.A. Formy nakhozhdeniya tonkodispersnogo zolota v khvostakh flotatsii [Forms of occurrence of finely dispersed gold in flotation tailings]. Obogashchenie rud. 2019. No. 5. P. 22–27. DOI: 10.17580/or.2019.05.04. (In Russ.).
3. Prokhorov K.V., Zlobin M.N. Kombinirovannaya tekhnologiya pererabotki khvostov obogashcheniya [Combined technology for processing enrichment tailings]. Tsvetnye metally. 2021. No. 8. P. 23–29. DOI: 10.17580/tsm.2021.08.03. (In Russ.).

4. Chanturiya V.A., Kozlov A.P. Aktual'nye problemy tekhnogennykh mestorozhdenii [Current problems of technogenic deposits]. Gornyi Zhurnal. 2014. No. 7. P. 45–50. (In Russ.).
5. A practical guide to re-treatment of gold processing residues. Minerals Engineering. – 2005. – DOI: 10.1016/S0892-6875(05)00131-7.
6. A review of circular economy strategies for mine tailings // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2024. – DOI: 10.1016/j.jece.2024.113118.
7. Cacciuttolo C. et al. Dry Stacking of Filtered Tailings for Large-Scale Production Rates over 100,000 Metric Tons per Day. Minerals. 2023. Vol. 13, No. 11. DOI: 10.3390/min13111385.
8. Celep O., Yazici E.Y. An innovative process for the recovery of gold from tailings // Journal of Cleaner Production. – 2020. – Vol. 254. – Art. 120087. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120087.
9. Characterization of Gold in Complex Historical Refractory Tailings for Enhanced Process Optimization. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. – 2023. – DOI: 10.1080/08827508.2023.2298728.
10. Davies M. Filtered Dry Stacked Tailings: The Fundamentals. Tailings and Mine Waste Conference, 2011 (updated recommendations 2020–2023).
11. Flotation of wolfram-molybdenum sand tailings at Tyrnyauz processing plant. Gornyi Zhurnal. – 2015. – DOI: 10.17580/gzh.2015.09.14.
12. Global Industry Standard on Tailings Management (GISTM). International Council on Mining and Metals (ICMM), UNEP, PRI, 2020 (updated 2023–2025). – International Council on Mining and Metals (ICMM), UNEP, PRI, 2025.
13. Historical assessment of metal recovery potential from old mine tailings. Waste Management // Waste Management. – 2018. – DOI: 10.1016/j.wasman.2018.05.044.
14. Kossoff D., Dubbin W.E., Alfredsson M. Mine tailings dams: characteristics, failure, environmental impacts, and remediation. Applied Geochemistry. 2014. Vol. 51. P. 229–245. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2014.09.010.
15. Long-term impact of the Tyrnyauz tungsten-molybdenum mining and processing factory waste on environmental pollution and children's population. Environmental Geochemistry and Health. – 2022. – DOI: 10.1007/s10653-022-01221-z.
16. Recovering gold from mine tailings: a selection of reactors for bio-oxidation at high pulp densities // Journal of Chemical Technology & Biotechnology. – 2021. – DOI: 10.1002/jctb.6530.
17. Small Scale Relocatable Modular Gold Processing Plant. Available at: [Электронный ресурс]. – URL: http://hz-mineralprocessing.com/3-1-small-scale-modular-gold-processing-plant.html (accessed: 01.11.2026).
18. Tailing dumps of the Tyrnyauz tungsten–molybdenum mining and processing complex: Current state and outlooks. Global Journal of Ecology. Available at: [Электронный ресурс]. // Global Journal of Ecology. – URL: https://www.agriscigroup.us/articles/GJE-5-125.php (accessed: 01.11.2026).

19. The Auplata modular gold recovery plant. Proceedings World Gold 2019. Available at: [Электронный ресурс]. // Proceedings World Gold. – URL: https://www.ausimm.com/publications/conference-proceedings/world-gold-2019/the-auplata-modular-gold-recovery-plant/ (accessed: 01.11.2026).

Статья поступила в редакцию: 14.10.2026
Статья принята к публикации: 25.10.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 622.831:528.88

DOI: 10.32743/UniTech.2026.151.10.23611

Пространственная связь деформаций земной поверхности по данным InSAR с подземными очистными блоками и воронками проседания на Хандизинском полиметаллическом месторождении

Ботиров Шохбос Соибович
ст. преподаватель
Термезский государственный университет инженерии и агротехнологий
Республика Узбекистан, г. Термез
E-mail: shoxbos.b@mail.ru

Номдоров Рустам Уралович
канд. техн. наук, доц.
Каршинский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Карши
E-mail: nomdorovrustam@gmail.com

Ражабов Шахбоз Холмамат угли
ассистент
Термезский государственный университет инженерии и агротехнологий
Республика Узбекистан, г. Термез

Spatial relationship between InSAR-derived surface deformations and underground stoping blocks and subsidence funnels at the Khandiza polymetallic deposit

Botirov Shokhbos Soibovich
senior Lecturer
Termez State University of Engineering and Agrotechnology
Uzbekistan, Termez

Nomdorov Rustam Uralovich
PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Karshi State Technical University
Uzbekistan, Karshi

Rajabov Shahboz Kholmat ugli
Assistant
Termez State University of Engineering and Agrotechnology
Uzbekistan, Termez

Библиографическое описание: Ботиров Ш.С., Номдоров Р.У., Ражабов Ш.Х.У. Пространственная связь деформаций земной поверхности по данным InSAR с подземными очистными блоками и воронками проседания на Хандизинском полиметаллическом месторождении // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23611

Аннотация

Подземная разработка Хандизинского полиметаллического месторождения (Сурхандарьинская область, Узбекистан) сопровождается проседанием земной поверхности, однако ранее были определены лишь скорость и общий рисунок деформаций, а их связь с конкретными очистными блоками не оценивалась. Цель работы — установить пространственную и временную связь деформаций поверхности, полученных методом дифференциальной InSAR, с очистными блоками и воронками проседания. Использованы радарные снимки Sentinel-1A (режим IW, формат SLC, поляризация VV+VH) за период с 10.08.2025 по 15.05.2026, обработанные в среде SNAP с фильтрацией Гольдштейна и развёртыванием фазы алгоритмом SNAPHU. Результаты InSAR сопоставлены с измерениями ГНСС-приёмника и электронного тахеометра на пяти пунктах: среднеквадратическая ошибка составила 3,07 и 1,79 мм соответственно. Максимальное проседание вдоль линии визирования достигло 291 мм, среднее — 126,4 мм на площади 1,03 км². Выделены три воронки проседания диаметром 310–420 м, приуроченные к блокам Б-1…Б-6. Средняя осадка по блокам убывает от 274 мм (блок Б-3) до 46 мм (блок Б-7); коэффициент Спирмена между давностью отработки и осадкой равен 0,86 (n = 7), однако давность и глубина отработки почти коллинеарны (r = −0,96), а частный коэффициент корреляции давности при фиксированной глубине равен 0,13 (p = 0,81), поэтому вклад давности по имеющимся данным не выделяется. Результаты можно использовать для выбора участков инструментального контроля.

Abstract

Underground mining at the Khandiza polymetallic deposit (Surkhandarya region, Uzbekistan) is accompanied by ground surface subsidence; however, previous work determined only the rate and the general pattern of deformation, and its relationship with specific stoping blocks was not assessed. The aim of this study is to establish the spatial and temporal relationship between surface deformations derived by differential InSAR and the stoping blocks and subsidence funnels. Sentinel-1A radar images (IW mode, SLC format, VV+VH polarization) acquired between 10 August 2025 and 15 May 2026 were processed in SNAP with Goldstein filtering and SNAPHU phase unwrapping. The InSAR results were compared with GNSS and total station measurements at five points: the root mean square error was 3.07 mm and 1.79 mm, respectively. The maximum line-of-sight subsidence reached 291 mm and the mean value was 126.4 mm over an area of 1.03 km². Three subsidence funnels 310–420 m in diameter were identified and associated with blocks B-1 to B-6. The mean subsidence per block decreases from 274 mm (block B-3) to 46 mm (block B-7); the Spearman correlation between time since mining and subsidence is 0.86 (n = 7), but time since mining and mining depth are nearly collinear (r = −0.96) and the partial correlation of time since mining at fixed depth is 0.13 (p = 0.81), so the contribution of time cannot be isolated with the available data. The results can be used to select areas for instrumental monitoring.

Ключевые слова: InSAR, дифференциальная интерферометрия, Sentinel-1, проседание земной поверхности, очистные блоки, воронки проседания, подземные горные работы.

Keywords: InSAR, differential interferometry, Sentinel-1, ground subsidence, stoping blocks, subsidence funnels, underground mining.

Введение

Подземная разработка рудных месторождений нарушает естественное напряжённое состояние массива горных пород и приводит к сдвижению и деформации земной поверхности: проседаниям, трещинам и воронкам обрушения [9]. Наблюдения нивелированием, ГНСС и тахеометрией дают высокоточные, но точечные данные и требуют выхода на потенциально опасные участки [3]. Спутниковая радиолокационная интерферометрия (InSAR) позволяет получать поле смещений на всей площади влияния горных работ дистанционно. Её применение для мониторинга подработанных территорий показано как для угольных, так и для рудных шахт [5, 10, 12].

Точность различных вариантов InSAR при мониторинге подработки оценивают по наземным измерениям [5]; в условиях низкой когерентности применяют методы на основе распределённых рассеивателей (DS-InSAR) [12]; трёхмерные компоненты смещений восстанавливают с привлечением модели depression angle [11]; временные ряды InSAR используют для прогноза смещений методами машинного обучения [7]. Для условий Центральной Азии дифференциальная интерферометрия применена для наблюдений за смещениями земной поверхности в Казахстане [2], а радарные данные рассматривают как дополнение к классическим маркшейдерским методам [3].

Ранее для Хандизинского месторождения нами были получены пространственное распределение и скорость проседания по данным Sentinel-1 [1]. Связь деформаций поверхности с положением, сроком отработки очистных блоков и геометрией воронок проседания при этом не рассматривалась. Цель настоящего исследования — количественно оценить эту связь. Задачи: построить поле деформаций методом дифференциальной InSAR; оценить его точность по данным ГНСС и электронного тахеометра; сопоставить зоны деформации с очистными блоками; охарактеризовать воронки проседания.

Материалы и методы

Объект исследования — Хандизинское полиметаллическое месторождение (Сурхандарьинская область, Республика Узбекистан), отрабатываемое подземным способом очистными блоками Б-1…Б-7. Согласно использованным данным о сроках отработки, блоки отрабатывались последовательно с 2016 по 2024 г., а фронт работ развивался с северо-запада на юго-восток.

Использованы радарные снимки спутника Sentinel-1A (C-диапазон, частота 5,405 ГГц, длина волны $\lambda \approx 55{,}5$ мм) в режиме Interferometric Wide Swath, формат Single Look Complex, поляризация VV+VH, пространственное разрешение 5 × 20 м, период повторного обзора 12 суток. Область интереса задавали на платформе ASF Vertex. Период наблюдений — с 10.08.2025 по 15.05.2026 (23 серии наблюдений); площадь области деформаций — 1,03 км².

Обработку выполняли в программной среде ESA SNAP в следующей последовательности: применение точных орбитальных файлов (Apply Orbit File), выделение подполосы (TOPSAR Split), совмещение снимков (Back-Geocoding), формирование интерферограммы, удаление топографической фазы по цифровой модели рельефа SRTM,

фильтрация по Гольдштейну [8], развёртывание фазы алгоритмом SNAPHU [4], геокодирование (Terrain Correction) в проекции UTM. Развёрнутую фазу φ переводили в смещение вдоль линии визирования спутника (LOS) по формуле:

$$d_{LOS} = -(\lambda / 4\pi) \cdot \varphi_{unw} \quad (1)$$

где d_{LOS} — смещение вдоль LOS, мм (отрицательные значения соответствуют удалению поверхности от спутника, то есть проседанию); λ — длина волны, мм; φ_{unw} — развёрнутая фаза, рад. Для оценки резкости изменения поля деформаций рассчитывали градиент:

$$\text{grad } D = \sqrt{[\ (\partial D/\partial x)^2 + (\partial D/\partial y)^2\ ]} \quad (2)$$

где grad D — градиент деформации, мм/м; D — деформация по InSAR, мм; x, y — плановые координаты, м.

Для верификации выполнены измерения ГНСС-приёмником Hi-Target V300 (режим RTK) и электронным тахеометром CTS-632R10M на пяти опорных пунктах, заложенных в зонах повышенной деформации по картам InSAR. Нулевой цикл выполнен 10.08.2025, повторный — 15.05.2026, то есть вблизи дат первого и последнего снимков; смещение пункта принимали равным разности вертикальных координат повторного и нулевого циклов. Расхождения оценивали через среднеквадратическую ошибку:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\{\ (1/n) \cdot \Sigma_{i=1\ldots n}\ [\ d_{i,InSAR} - d_{i,geo}\ ]^2\ \}} \quad (3)$$

где $d_{i,InSAR}$ — деформация по InSAR в i-м пункте, мм; $d_{i,geo}$ — смещение по ГНСС либо тахеометру, мм; n — число пунктов. Дополнительно рассчитывали среднюю абсолютную ошибку (MAE), смещение (bias) и коэффициент детерминации R^2.

Связь с очистными блоками оценивали по контурам блоков, срокам их отработки и средней осадке по каждому блоку. Давность отработки блока определяли как число лет от начала его отработки до 2026 г. Глубину отработки принимали равной середине интервала глубин для зоны, к которой относится блок (365, 420, 465 и 515 м). Связь характеризовали коэффициентами корреляции Пирсона и Спирмена (n = 7), частными коэффициентами корреляции и линейной регрессией «осадка ~ давность + глубина».

Результаты и обсуждения

Поле деформаций. За период с 10.08.2025 по 15.05.2026 на площади 1,03 км² зафиксировано проседание с максимумом 291 мм и средним значением 126,4 мм при стандартном отклонении 68,7 мм; максимальный градиент деформации составил 3,8 мм/м (табл. 1). Максимум приурочен к северо-западной части участка; к юго-востоку проседание плавно убывает (рис. 1). Все значения приведены вдоль LOS и не пересчитывались в вертикальную компоненту.

Таблица 1. Статистические показатели поля деформаций по данным InSAR

Показатель	Значение
Период наблюдений	10.08.2025–15.05.2026

Показатель	Значение
Число серий наблюдений	23
Максимальное проседание (LOS), мм	−291
Среднее значение деформации, мм	−126,4
Стандартное отклонение, мм	68,7
Максимальный градиент, мм/м	3,8
Площадь области деформаций, км²	1,03

Точность. Расхождения InSAR с наземными измерениями на пяти пунктах не превысили 4 мм (табл. 2). Среднеквадратическая ошибка относительно ГНСС составила 3,07 мм, относительно тахеометра — 1,79 мм. Систематическое смещение отрицательно (−1,8 и −1,2 мм): InSAR в среднем показывает проседание несколько больше наземных данных. Значения R^2, близкие к единице, получены на малой выборке (n = 5) с большим диапазоном смещений и поэтому отражают в первую очередь согласованность общего хода, а не точность в каждом пункте.

Таблица 2. Согласованность InSAR с наземными измерениями (n = 5 пунктов)

Показатель	InSAR – ГНСС	InSAR – тахеометр
RMSE, мм	3,07	1,79
MAE, мм	3,00	1,60
Максимальное расхождение, мм	4,00	3,00
Смещение (bias), мм	−1,80	−1,20
R^2	0,9991	0,9997

Воронки проседания. На карте деформаций выделены три воронки (табл. 3, рис. 1). Диаметр воронок уменьшается с 420 до 310 м, а максимальное проседание — с 291 до 164 мм при движении к юго-востоку. Расстояние между центрами воронок V-1 и V-2 составляет около 960 м, между V-2 и V-3 — около 570 м (по координатам центров). Такая картина согласуется с направлением развития фронта очистных работ с северо-запада на юго-восток.

Таблица 3. Параметры воронок проседания

Воронка	Центр X, м (UTM)	Центр Y, м (UTM)	Макс. осадка, мм	Диаметр, м	Площадь, м²	Блоки
V-1	663 050	4 161 580	−291	420	138 500	Б-1, Б-2
V-2	663 850	4 161 050	−238	360	102 300	Б-3, Б-4
V-3	664 200	4 160 600	−164	310	74 800	Б-5, Б-6

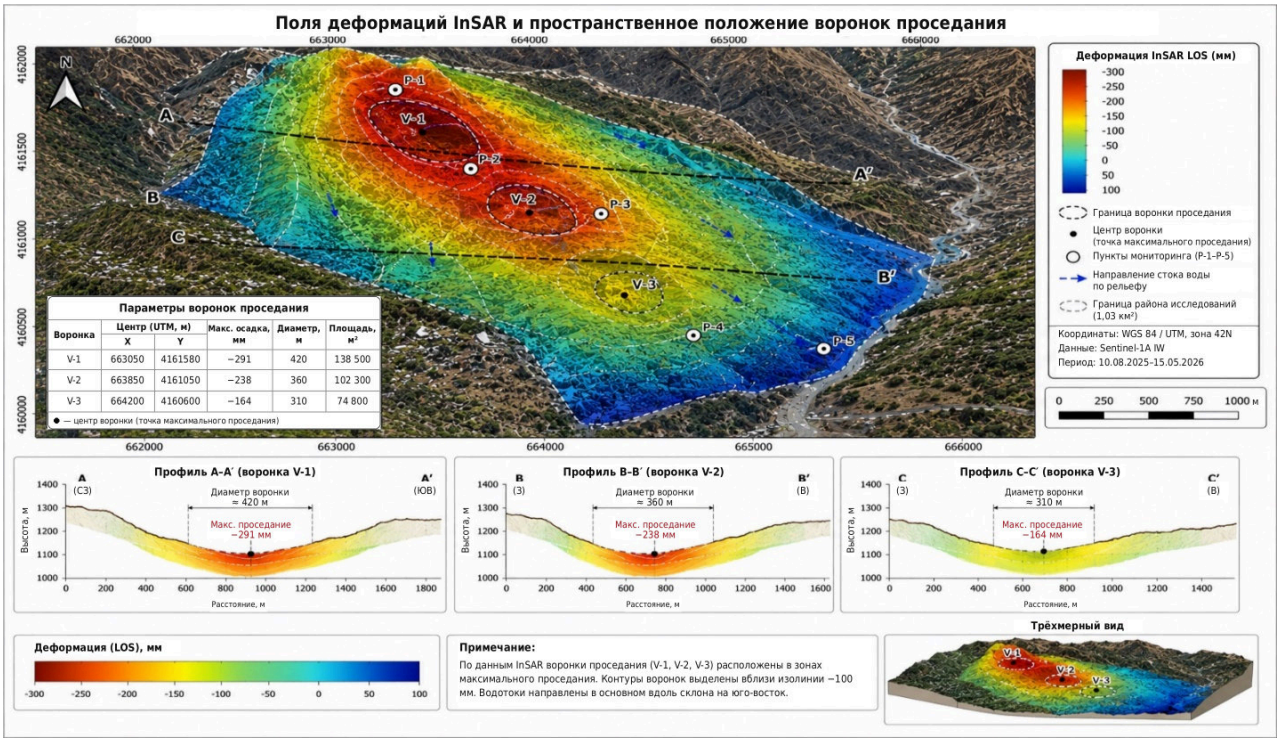


Рисунок 1. Поле деформаций InSAR (LOS, мм), воронки проседания V-1…V-3 и профили A–A′, B–B′, C–C′ (период 10.08.2025–15.05.2026)

Связь с очистными блоками. Зоны максимальной деформации расположены над очистными блоками или вплотную к ним. Средняя осадка по блокам растёт от 211 мм (Б-1) до 274 мм (Б-3), после чего последовательно убывает до 46 мм (Б-7) (табл. 4). Коэффициент Спирмена между давностью отработки и средней осадкой равен 0,86 (n = 7, p ≈ 0,014; расчёт авторов по табл. 4), однако давность и глубина отработки почти коллинеарны: коэффициент Пирсона между ними равен −0,96, фактор инфляции дисперсии — 11,5 (табл. 5). После исключения влияния глубины частный коэффициент корреляции осадки с давностью падает до 0,13 (p = 0,81), а частный коэффициент корреляции с глубиной при фиксированной давности равен −0,31 (p = 0,55). В регрессии «осадка ~ давность + глубина» (R^2 = 0,70) ни один коэффициент не значим: 8 ± 33 мм/год для давности (p = 0,81) и −0,8 ± 1,3 мм/м для глубины (p = 0,55). Если давность отсчитывать от окончания отработки блока, вывод не меняется (частная корреляция 0,48, p = 0,34). Таким образом, значимая простая корреляция отражает совместное изменение давности и глубины, и по имеющимся данным (n = 7, глубина задана по зонам, а не по блокам) вклад давности нельзя отделить от вклада глубины. Отклонение от монотонности у блоков Б-1 и Б-2 и смещение центров воронок относительно проекций блоков могут быть связаны с геологическими нарушениями и очерёдностью отработки; эта гипотеза требует проверки геомеханическим моделированием.

Таблица 4. Средняя осадка по очистным блокам

Блок	Период отработки	Давность, лет	Глубина отработки в зоне, м	Средняя осадка, мм
Б-1	2016–2018	10	320–410	−211
Б-2	2018–2019	8	320–410	−243
Б-3	2019–2020	7	380–460	−274
Б-4	2020–2021	6	420–510	−198

Блок	Период отработки	Давность, лет	Глубина отработки в зоне, м	Средняя осадка, мм
Б-5	2021–2022	5	420–510	−129
Б-6	2022–2023	4	470–560	−77
Б-7	2023–2024	3	470–560	−46

Таблица 5. Коэффициенты корреляции Пирсона r (в скобках — Спирмена ρ), n = 7

	Осадка	Давность	Глубина
Осадка	—	0,82 (0,86)	−0,83 (−0,86)
Давность	0,82 (0,86)	—	−0,96 (−0,97)
Глубина	−0,83 (−0,86)	−0,96 (−0,97)	—

Обсуждение

Максимальное проседание на Хандизинском месторождении (291 мм за девять месяцев) того же порядка, что и накопленное проседание 346,1 мм, полученное методом SBAS-InSAR на подземном медном руднике Tongkuangyu к апрелю 2020 г. [10], что подтверждает правдоподобие полученных величин для подземных металлических рудников. Согласованность InSAR с ГНСС и тахеометром (RMSE 1,8–3,1 мм) согласуется с подходом, когда радарные данные дополняют классические методы и подтверждаются ими [3, 5]. Работа [6] показывает по данным ГНСС, что проседание может сохраняться десятилетия после окончания отработки; поэтому блоки Б-1 и Б-2 (2016–2019 гг.) целесообразно оставить в программе наблюдений. Максимальный градиент 3,8 мм/м необходимо учитывать при оценке состояния подрабатываемых объектов; вопросы их охраны рассмотрены в [9].

Ограничения. Деформации приведены вдоль LOS; для перехода к вертикальной и горизонтальной компонентам требуется учёт геометрии съёмки, например по модели [11]. Верификация выполнена по пяти пунктам, а анализ связи с блоками — по семи значениям при глубине, заданной по зонам, поэтому оценки следует считать предварительными. Прогноз развития воронок на основе временных рядов [7] в работе не выполнялся.

Заключение

Дифференциальная InSAR по данным Sentinel-1A выявила на площади 1,03 км² поле проседания с максимумом 291 мм и средним значением 126,4 мм за период с 10.08.2025 по 15.05.2026.

Среднеквадратическая ошибка InSAR относительно ГНСС составила 3,07 мм, относительно электронного тахеометра — 1,79 мм (пять пунктов).

Выделены три воронки проседания диаметром 310–420 м с максимальным проседанием 291, 238 и 164 мм, приуроченные к блокам Б-1…Б-6; их центры последовательно смещаются к юго-востоку вслед за фронтом очистных работ.

Средняя осадка по блокам убывает от 274 мм (Б-3) до 46 мм (Б-7); коэффициент Спирмена между давностью отработки и осадкой равен 0,86, однако давность и глубина отработки почти коллинеарны (r = −0,96), частная корреляция давности при фиксированной глубине равна 0,13 (p = 0,81), поэтому вклад давности по имеющимся данным не выделяется.

Результаты целесообразно использовать для выбора участков инструментального контроля; дальнейшая работа должна включать разложение LOS-смещений на компоненты и расширение выборки контрольных пунктов.

Список литературы

1. Ботиров, Ш.С. Применение технологии InSAR для геомеханического мониторинга деформаций земной поверхности, вызванных горными работами, на Хандизинском полиметаллическом месторождении / Ш.С. Ботиров, Р.У. Номдоров // Universum: технические науки. – 2025. – № 8 (137). – С. 49–52. URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/20702 (дата обращения: 20.10.2026).
2. Сатбергенова, А.К. Дифференциалды интерферометрия әдісі арқылы жер бетінің қозғалысын бақылау нәтижелері / А.К. Сатбергенова, А. Қ. Зекен, Ф.К. Низаметдинов, Н.Ф. Низаметдинов // Горный журнал Казахстана. – 2025. – № 3 (239). – С. 26–31. – DOI: 10.48498/minmag.2025.239.3.007.
3. Akmatov, D. Zh. Radar Interferometry as Supplement to Classical Methods to Observe Earth's Surface Displacement / D. Zh. Akmatov, V.V. Nikolaichuk, A.A. Tikhonov, R.V. Shevchuk // Mining Industry Journal (Gornay Promishlennost). – 2020. – № 1. – P. 144–147. – DOI: 10.30686/1609-9192-2020-1-144-147.
4. Chen, C.W. Phase unwrapping for large SAR interferograms: statistical segmentation and generalized network models / C.W. Chen, H.A. Zebker // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2002. – T. 40, № 8. – P. 1709–1719. – DOI: 10.1109/TGRS.2002.802453.
5. Chen, Y. Accuracy Verification and Correction of D-InSAR and SBAS-InSAR in Monitoring Mining Surface Subsidence / Y. Chen, S. Yu, Q. Tao, G. Liu, L. Wang, F. Wang // Remote Sensing. – 2021. – T. 13, № 21. – Art. 4365. – DOI: 10.3390/rs13214365.
6. Gavrilescu, T. Persistent Mining-Induced Subsidence Two Decades After Underground Coal Exploitation: Evidence from Multi-Temporal GNSS Monitoring / T. Gavrilescu, C. Păunescu // Mining. – 2026. – T. 6, № 3. – DOI: 10.3390/mining6030057.
7. Głąbicki, D. Displacement Time Series Forecasting Using Sentinel-1 SBAS-InSAR Results in a Mining Subsidence Case Study: Evaluation of Machine Learning and Deep Learning Methods // Remote Sensing. – 2025. – T. 17, № 23. – Art. 3905. – DOI: 10.3390/rs17233905.
8. Goldstein, R.M. Radar interferogram filtering for geophysical applications / R.M. Goldstein, C.L. Werner // Geophysical Research Letters. – 1998. – T. 25, № 21. – P. 4035–4038. – DOI: 10.1029/1998GL900033.
9. Kirillov, S.G. Rock Mass Movement in Development of Talnakh and Oktyabrskoye Deposits. Measures to Protect Undermined Buildings and Facilities / S.G. Kirillov, E.S. Semykin, N.I. Mokritskaya, A.R. Krishtapovich, S.S. Efimenko // Mining Industry Journal (Gornay Promishlennost). – 2020. – № 6. – P. 106–111. – DOI: 10.30686/1609-9192-2020-6-106-111.
10. Li, J. Wavelet-Based Analysis of Subsidence Patterns and High-Risk Zone Delineation in Underground Metal Mining Areas Using SBAS-InSAR / J. Li, Z. Tan, N. Zeng, L. Xu, Y. Yang, A. Siddique, J. Dang, J. Zhang, X. Wang // Land. – 2025. – T. 14, № 5. – Art. 992. – DOI: 10.3390/land14050992.

11. Wang, Z. Combination of InSAR with a Depression Angle Model for 3D Deformation Monitoring in Mining Areas / Z. Wang, H. Dai, Y. Yan, J. Liu, J. Ren // Remote Sensing. – 2023. – T. 15, № 7. – Art. 1834. – DOI: 10.3390/rs15071834.
12. Zhang, L. Surface Subsidence Monitoring of Mining Areas in Hunan Province Based on Sentinel-1A and DS-InSAR / L. Zhang, P. Gao, Z. Gan, W. Wu, Y. Sun, C. Zhu, S. Long, M. Liu, H. Peng // Sensors. – 2023. – T. 23, № 19. – Art. 8146. – DOI: 10.3390/s23198146.

References

1. Botirov Sh.S., Nomdorov R.U. [Application of InSAR technology for geomechanical monitoring of ground surface deformations caused by mining operations at the Khandiza polymetallic deposit] // Universum: tekhnicheskie nauki. – 2025. – No. 8 (137). – P. 49–52. – URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/20702 (accessed: 20.10.2026). (In Russ.).
2. Satbergenova A.K., Zeken A.K., Nizametdinov F.K., Nizametdinov N.F. [Results of monitoring Earth surface motion by the differential interferometry method] // Gornyi zhurnal Kazakhstana. – 2025. – No. 3 (239). – P. 26–31. – DOI: 10.48498/minmag.2025.239.3.007.
3. Akmatov D.Zh., Nikolaichuk V.V., Tikhonov A.A., Shevchuk R.V. Radar Interferometry as Supplement to Classical Methods to Observe Earth's Surface Displacement // Mining Industry Journal (Gornay Promishlennost). – 2020. – No. 1. – P. 144–147. – DOI: 10.30686/1609-9192-2020-1-144-147.
4. Chen C.W., Zebker H.A. Phase unwrapping for large SAR interferograms: statistical segmentation and generalized network models // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2002. – Vol. 40, No. 8. – P. 1709–1719. – DOI: 10.1109/TGRS.2002.802453.
5. Chen Y., Yu S., Tao Q., Liu G., Wang L., Wang F. Accuracy Verification and Correction of D-InSAR and SBAS-InSAR in Monitoring Mining Surface Subsidence // Remote Sensing. – 2021. – Vol. 13, No. 21. – Art. 4365. – DOI: 10.3390/rs13214365.
6. Gavrilescu T. Păunescu C. Persistent Mining-Induced Subsidence Two Decades After Underground Coal Exploitation: Evidence from Multi-Temporal GNSS Monitoring // Mining. – 2026. – Vol. 6, No. 3. – DOI: 10.3390/mining6030057.
7. Głąbicki D. Displacement Time Series Forecasting Using Sentinel-1 SBAS-InSAR Results in a Mining Subsidence Case Study: Evaluation of Machine Learning and Deep Learning Methods // Remote Sensing. – 2025. – Vol. 17, No. 23. – Art. 3905. – DOI: 10.3390/rs17233905.
8. Goldstein R.M., Werner C.L. Radar interferogram filtering for geophysical applications // Geophysical Research Letters. – 1998. – Vol. 25, No. 21. – P. 4035–4038. – DOI: 10.1029/1998GL900033.
9. Kirillov S.G., Semykin E.S., Mokritskaya N.I., Krishtapovich A.R., Efimenko S.S. Rock Mass Movement in Development of Talnakh and Oktyabrskoye Deposits. Measures to Protect Undermined Buildings and Facilities // Mining Industry Journal (Gornay Promishlennost). – 2020. – No. 6. – P. 106–111. – DOI: 10.30686/1609-9192-2020-6-106-111.

10. Li J., Tan Z., Zeng N., Xu L., Yang Y., Siddique A., Dang J., Zhang J., Wang X. Wavelet-Based Analysis of Subsidence Patterns and High-Risk Zone Delineation in Underground Metal Mining Areas Using SBAS-InSAR // Land. – 2025. – Vol. 14, No. 5. – Art. 992. – DOI: 10.3390/land14050992.
11. Wang Z., Dai H., Yan Y., Liu J., Ren J. Combination of InSAR with a Depression Angle Model for 3D Deformation Monitoring in Mining Areas // Remote Sensing. – 2023. – Vol. 15, No. 7. – Art. 1834. – DOI: 10.3390/rs15071834.
12. Zhang L., Gao P., Gan Z., Wu W., Sun Y., Zhu C., Long S., Liu M., Peng H. Surface Subsidence Monitoring of Mining Areas in Hunan Province Based on Sentinel-1A and DS-InSAR // Sensors. – 2023. – Vol. 23, No. 19. – Art. 8146. – DOI: 10.3390/s23198146.

Статья поступила в редакцию: 29.10.2026
Статья принята к публикации: 10.11.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 669.33:552.1

DOI: 10.32743/UniTech.2026.152.11.23759

Исследование химического состава, петрографических особенностей и форм нахождения меди в шлаках печи Ванюкова

Курбанов Бунёд Тулкинович
соискатель
Каршинский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Карши
ORCID: https://orcid.org/0009-0007-9835-7671
E-mail: bunedkurbanov09@gmail.com

Ваккасов Бахтияр Абдураимович
директор
медеплавильного завода (МПЗ) АО «Алмалыкский горно-металлургический комбинат»
Республика Узбекистан, г. Алмалык
ORCID: https://orcid.org/0009-0006-0888-7824
E-mail: b.vakkasov@agmk.uz

Хасанов Улугбек Абдирашидович
PhD по техническим наукам, инженер
I категории отдела охраны окружающей среды и системы экологического менеджмента АО «Алмалыкский горно-металлургический комбинат»
Республика Узбекистан, г. Алмалык
ORCID: https://orcid.org/0009-0007-8363-9422
E-mail: u.hasanov@agmk.uz

Investigation of the chemical composition, petrographic characteristics, and forms of copper occurrence in Vanyukov furnace slags

Kurbanov Bunyod
Researcher of Karshi State Technical University
Republic of Uzbekistan, Karshi

Vakkasov Bakhtiyor
Director of the Copper Smelter (MPZ) of JSC Almalyk Mining and Metallurgical Combine
Republic of Uzbekistan, Almalyk

Библиографическое описание: Курбанов Б.Т., Ваккасов Б.А., Хасанов У.А. Исследование химического состава, петрографических особенностей и форм нахождения меди в шлаках печи Ванюкова // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23759

Khasanov Ulugbek
PhD
in Technical Sciences First-category engineer of the Department of Environmental Protection and Environmental Management System of JSC Almalyk Mining and Metallurgical Combine
Republic of Uzbekistan, Almalyk

Аннотация

Потери меди со шлаком плавки в жидкой ванне остаются одной из основных статей потерь металла на медеплавильном заводе АО «Алмалыкский ГМК». Цель работы – установить петрографические особенности шлака печи Ванюкова и формы нахождения в нём меди, от которых зависит выбор способа обеднения. Изучены две пробы шлака: № 3 – текущий шлак печи и № 5 – шлак, отобранный в период опытных испытаний режима обеднения. Применены химический, спектральный и рентгенофлуоресцентный анализы, определение плотности и оптическая микроскопия шлифов в проходящем и отражённом свете. Пробы близки по составу (SiO_2 35,9–36,3 %, FeO 37,5–38,4 %, Al_2O_3 6,7–7,6 %), но в пробе № 3 выше степень окисленности железа: доля Fe^{3+} в общем железе составляет 13,1 % против 11,6 %, плотность – 4,91 против 4,75 г/см^3. Шлак сложен криптокристаллической стекловатой массой с непрозрачными включениями размером 0,1–1,5 мм, среди которых преобладает магнетит; встречаются халькопирит, пирит, сфалерит и галенит. Медь находится в шлаке в виде капель штейна и восстановленной меди, в окисленной форме (куприт) и в виде цепочек сульфидов, выделившихся по трещинам при остывании. В пробе № 3 штейн распределён неравномерно и восстановлен не полностью, что связано с повышенным содержанием магнетита. Содержание золота составляет 0,67 г/т в пробе № 3 и 0,34 г/т в пробе № 5. Основная часть меди в шлаке находится в механически увлечённой форме, поэтому обеднение следует строить на снижении содержания магнетита и укрупнении сульфидных включений при медленном охлаждении.

Abstract

Copper losses with bath smelting slag are a major source of metal loss at the JSC Almalyk MMC copper smelter. The aim of the work is to establish the petrographic features of Vanyukov furnace slag and the forms of copper occurrence in it, which govern the choice of a slag cleaning method. Two slag samples were studied: No. 3, the current furnace slag, and No. 5, slag taken during pilot tests of the depletion regime. Chemical, spectral and X-ray fluorescence analyses, density measurement and optical microscopy in transmitted and reflected light were used. The samples are close in composition (SiO_2 35.9–36.3 %, FeO 37.5–38.4 %, Al_2O_3 6.7–7.6 %), but sample No. 3 shows a higher degree of iron oxidation: the Fe^{3+} share of total iron is 13.1 % against 11.6 %, and its density is 4.91 against 4.75 g/cm^3. The slag consists of a cryptocrystalline glassy mass with opaque inclusions 0.1–1.5 mm in size, mainly magnetite, with chalcopyrite, pyrite, sphalerite and galena. Copper occurs as matte droplets and reduced copper, in oxidised form (cuprite) and as chains of sulphides precipitated along cracks during cooling. In sample No. 3 the matte is unevenly distributed and incompletely reduced, which is related to the higher magnetite

content. The gold content is 0.67 g/t in sample No. 3 and 0.34 g/t in sample No. 5. Most of the copper in the slag is mechanically entrained; slag cleaning should therefore be based on lowering the magnetite content and coarsening the sulphide inclusions by slow cooling.

Ключевые слова: шлак печи Ванюкова, потери меди, петрография, штейн, магнетит, куприт, обеднение шлака.

Keywords: Vanyukov furnace slag, copper losses, petrography, matte, magnetite, cuprite, slag cleaning.

Введение

На каждую тонну меди, получаемой пирометаллургическим способом, образуется около 2,2 т шлака [9]. Медные шлаки заметно различаются по химическому и минеральному составу, который определяется составом концентрата и флюсов, типом плавильного агрегата и условиями охлаждения [14]. Даже после обеднения содержание меди в отвальном шлаке нередко выше, чем в бедных сульфидных рудах, поэтому снижение потерь меди со шлаком остаётся одной из главных задач медеплавильного производства.

Отвалы шлаков медеплавильного завода АО «Алмалыкский ГМК» формируются с 1964 г. и расположены в 3,7 км от г. Алмалыка. В них накоплено около 8 млн т шлаков, в том числе 5 439 503 т шлака отражательной плавки, 1 836 117 т шлака кислородно-факельной плавки и 724 380 т шлака печи Ванюкова. Отвальные шлаки содержат 0,06–0,9 % Cu, до 50 % железа и около 32 % SiO_2 [5]. В них установлены силикатная шпинель, магнезиоферрит, стекло, кварц, фаялит, форстерит, куприт, гематит, пирротин, троилит, халькозин, сфалерит, галенит, борнит, нестехиометрический халькопирит $Cu_{1+x}Fe_{1+x}S_{2+x}$, а также самородные серебро и медь [5].

Для обеднения шлаков на заводе опробованы термогравитационное отстаивание в ковше [6] и флотация шлака после медленного охлаждения [3]. Эффективность обоих способов зависит от того, в какой форме находится медь и каково строение шлака. Фазовый состав шлака кислородно-факельной плавки этого завода изучен достаточно подробно: основная фаза – фаялит, присутствуют сложные шпинели на основе магнетита, сульфиды и стекловидная фаза [16]. Для шлака печи Ванюкова петрографических данных значительно меньше.

Обзор литературы

Медь теряется со шлаком в двух формах. Растворённая медь находится в шлаке в виде оксида и сульфида, механически увлечённая – в виде капель штейна и металла, не успевших осесть [1; 17]. Соотношение этих форм зависит от агрегата и режима плавки. Для печи Ванюкова Балхашского медеплавильного завода доля механических потерь оценена в 75–80 % всей меди шлака, а размер частиц штейна в сифонном шлаке изменяется от долей микрометра до 450 мкм [7]. Близкие результаты получены для печи донной продувки SKS: на долю увлечённой меди приходится 80–90 % потерь, а содержание меди в шлаке растёт с повышением содержания меди в штейне, особенно выше 68 % [18]. Повышенные потери меди на Балхашском заводе связывают также с низкой флюсующей способностью кварцевой

руды, используемой в шихте [8]. Для печи Ванюкова АО «Алмалыкский ГМК» установлено, что оставшаяся в шлаке медь представлена в основном тонкой сульфидной взвесью крупностью менее 0,2 мм [2].

Значительное влияние на потери меди оказывает состав шлака. Добавки CaO и B_2O_3 в количестве до 4 % от массы шихты снижают содержание меди в шлаке взвешенной плавки, при больших добавках потери вновь возрастают [15]. На заводе в Маунт-Айзе регулирование состава и вязкости шлака с помощью термодинамических моделей позволило снизить содержание меди в шлаке с 3,1 до 0,76 % [17]. Главным компонентом, повышающим вязкость железосиликатного шлака и затрудняющим осаждение капель штейна, считается магнетит [1].

Строение шлака определяется и условиями его охлаждения. При затвердевании растворённая в силикатной фазе медь выделяется в виде тонкодисперсных включений [13]. В обычном шлаке медь находится в виде мелких сульфидов, тесно связанных с фаялитовой матрицей, поэтому физические методы обогащения дают низкое извлечение [10]. Модифицирование жидкого шлака добавками и охлаждение со скоростью 1,5 °C/мин до 900 °C позволяют укрупнить сульфидные зёрна [10; 11]. В промышленных испытаниях такое модифицирование снизило содержание магнетита, улучшило текучесть шлака и повысило извлечение меди при флотации с 69,15 до 73,38 % [12]. Если же медь находится в тонких срастаниях и частично в оксидной форме, флотация шлака малоэффективна: на флотационной фабрике рудника Бор извлечение меди из шлака составило 31,66 %, а в хвостах оставалось 0,3–0,4 % Cu [4].

Таким образом, выбор способа обеднения требует знания форм нахождения меди в конкретном шлаке. Цель работы – установить петрографические и минералогические особенности шлака печи Ванюкова АО «Алмалыкский ГМК» и выделить формы нахождения меди, которые необходимо учитывать при выборе способа обеднения.

Объект и методы исследования

Исследованы две пробы шлака печи Ванюкова медеплавильного завода АО «Алмалыкский ГМК»: № 3 – текущий шлак печи и № 5 – шлак, отобранный в период опытных испытаний режима обеднения 10–25 мая 2021 г.

Химический состав проб определён методами химического анализа совместно с ГП «Институт минеральных ресурсов» Госкомгеологии Республики Узбекистан, содержание золота и элементов-примесей – спектральным анализом. Рентгенофлуоресцентный анализ выполнен на энергодисперсионном спектрометре Rigaku NEX CG (Япония) в Ташкентском химико-технологическом институте. Спектрометр позволяет одновременно получать содержание элементов и их спектры, что облегчает сравнение проб. Определена также объёмная плотность проб.

Шлифы изготовлены на полуавтоматическом станке Struers LaboPol-5 с приставкой LaboForce. Частота вращения шлифовального круга регулируется в пределах 0–500 об/мин, усилие прижима образцов – 0–40 Н. Образцы заливали эпоксидной смолой, шлифовали и полировали алмазными суспензиями крупностью 9, 3 и 1 мкм. Шлифы изучали на

микроскопе Olympus GX71F-5 с увеличением от 12,5 до 1000 в проходящем поляризованном и в отражённом свете. Минералы определяли по оптическим свойствам: цвету, отражательной способности, форме выделений и анизотропии.

Долю трёхвалентного железа в общем железе и условное содержание магнетита рассчитывали по данным химического анализа:

$$\eta_{Fe^{3+}} = \frac{Fe_2O_3}{Fe_2O_{3общ}} \cdot 100\ \% \quad (1)$$

$$C_{Fe_3O_4} = 1,45 \cdot Fe_2O_3 \quad (2)$$

где Fe_2O_3 и $Fe_2O_{3общ}$ – содержание трёхвалентного железа и общего железа в пересчёте на Fe_2O_3, %; 1,45 – отношение молярных масс Fe_3O_4 и Fe_2O_3 (231,5/159,7). Формула (2) предполагает, что всё трёхвалентное железо входит в магнетит, поэтому даёт верхнюю оценку его содержания.

Результаты и обсуждение

Обе пробы имеют чёрный цвет и тусклый металлический блеск, структура шлака криптокристаллическая. В пробе № 5 на поверхности скола хорошо видны протокристаллы с лучистым ростом. В пробе № 3 радиально-лучистое строение нарушено удлинёнными призматическими кристаллами, расположенными поперёк и наискось. Плотность пробы № 3 составляет 4,91 г/см3, пробы № 5 – 4,75 г/см3. Химический состав проб приведён в табл. 1.

Таблица 1. Химический состав проб шлака печи Ванюкова, %

Проба	**SiO_2**	**$Fe_2O_{3общ}$**	**Fe_2O_3**	**FeO**	**Al_2O_3**	**CaO**	**MgO**	**Na_2O**
№ 3	36,28	49,03	6,43	38,38	6,73	2,75	1,40	1,20
№ 5	35,90	47,10	5,44	37,53	7,64	3,34	1,40	1,10
Проба	**K_2O**	**TiO_2**	**MnO**	**P_2O_5**	**SO_3**	**$S_{сульф}$**	**Сумма**	
№ 3	1,02	0,30	0,15	0,16	3,10	1,76	100,75	
№ 5	1,12	0,34	0,14	0,14	2,46	1,14	99,30	

Пробы мало различаются по содержанию основных компонентов. Железа в пересчёте на металл в пробе № 3 содержится 34,3 %, в пробе № 5 – 32,9 %, отношение Fe/SiO_2 составляет 0,95 и 0,92 соответственно. Заметнее различается степень окисленности железа: по формуле (1) доля Fe^{3+} равна 13,1 % в пробе № 3 и 11,6 % в пробе № 5. Содержание магнетита по формуле (2) не превышает 9,3 и 7,9 % соответственно. Этим же объясняется более высокая плотность пробы № 3. В пробе № 3 выше и содержание сульфидной серы (1,76 против 1,14 %), т.е. в ней осталось больше штейна и сульфидов. Суммы анализов (99,3–100,8 %) подтверждают полноту определения основных компонентов.

Химические свойства шлака удобно оценивать по его модулям. Отношение FeO/SiO_2 составляет 1,06 в пробе № 3 и 1,05 в пробе № 5, основность $(FeO + CaO + MgO)/SiO_2$ – 1,17 и 1,18, отношение $(CaO + MgO)/SiO_2$ – 0,11 и 0,13, кремнезёмный модуль SiO_2/Al_2O_3 – 5,4 и 4,7. По составу это типичный железосиликатный (фаялитовый) шлак с низким

содержанием оксидов кальция и магния. Пробы почти не различаются по основности, поэтому различие в состоянии штейна связано прежде всего со степенью окисленности железа, а не с соотношением основных и кислотных оксидов. Малое содержание CaO указывает на резерв регулирования свойств шлака: добавки CaO в количестве до 4 % от массы шихты снижают содержание меди в шлаке [15].

Состав шлака печи Ванюкова по данным рентгенофлуоресцентного анализа приведён в табл. 2 [5]. Анализ даёт всё железо в форме Fe_2O_3 и не учитывает FeO, поэтому содержание железа в нём завышено, а содержание SiO_2 занижено по сравнению с химическим анализом. Вместе с тем он показывает содержание цветных металлов: 1,0 % CuO, что соответствует 0,80 % Cu, 1,82 % ZnO (1,46 % Zn) и 0,35 % PbO.

Таблица 2. Состав шлака печи Ванюкова по данным рентгенофлуоресцентного анализа, %

SiO_2	**Fe_2O_3**	**Al_2O_3**	**CaO**	**MgO**	**K_2O**	**SO_3**	**CuO**
28,2	52,3	5,06	1,70	1,06	2,27	1,71	0,999
ZnO	**PbO**	**TiO_2**	**MnO**	**Co_2O_3**	**BaO**	**Sb_2O_3**	**As_2O_3**
1,82	0,346	0,299	0,134	0,110	0,111	0,0717	0,0248

Спектральный анализ выявил в шлаке золото: 0,67 г/т в пробе № 3 и 0,34 г/т в пробе № 5. Сумма содержаний петрогенных элементов в пробе № 3 в 1,45 раза выше, чем в пробе № 5, а цинка в ней примерно вдвое больше, что согласуется с присутствием сфалерита. Рентгенофлуоресцентный анализ показал наличие в шлаке серебра, меди, цинка, мышьяка, сурьмы, свинца, железа, титана, хрома, марганца, молибдена и олова. Спектр пробы № 5 шире на три элемента, в том числе в ней обнаружен иридий.

Барий и титан входят в состав сложных силикатов металлов, составляющих основную массу шлака. Оксиды железа в обеих пробах связаны преимущественно с фаялитом, который срастается с силикатом кальция и энстатитом. Калий и натрий переходят в растворимую форму под действием летучих компонентов – серы, фосфора, углекислоты и воды. Содержание ряда редкоземельных элементов (скандия, церия, самария, иттрия, иттербия) превышает кларк, повышены также содержания кобальта, никеля, марганца и хрома. Высокое содержание молибдена характерно для руд Алмалыкского рудного поля, перерабатываемых заводом.

В проходящем свете шлак представлен тонко-криптокристаллической массой окрашенного стекла с многочисленными непрозрачными включениями (рис. 1, а). Включения размером от 0,1 до 1,5 мм имеют остроугольную ксеноморфную форму, среди них встречаются кристаллы с чёткими гранями. Большая часть включений относится к магнетиту; между его зёрнами находятся ксеноморфные и квадратные выделения халькопирита, пирита, сфалерита и галенита. Округлые светлые участки на рис. 1, а – поры, образовавшиеся при кристаллизации расплава.

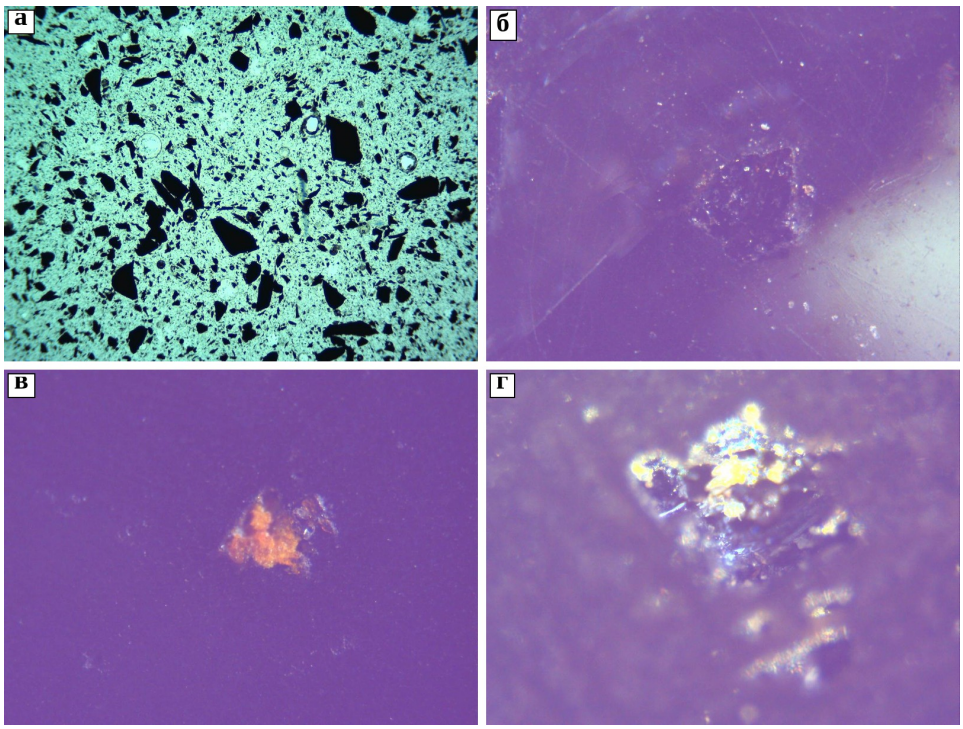


Рисунок 1. Микроструктура шлака печи Ванюкова: а – проба № 5, ×40, проходящий свет, николи скрещены; б – проба № 3, неравномерное распределение штейна; в – проба № 5, хорошо восстановленный штейн медно-красного цвета; г – проба № 5, слабо восстановленный штейн в смеси с оксидными минералами

В отражённом свете выделяются три формы нахождения меди. Первая – капли штейна и восстановленной меди медно-красного цвета (рис. 1, в). Это механически увлечённая медь, которая не успела осесть в печи. Вторая – окисленная медь: голубоватые выделения куприта и браунита, рядом с которыми находятся жёлтые пятна оксидов железа (рис. 1, г). Такую медь нельзя перевести в штейн одним отстаиванием, для этого необходимо восстановление. Третья форма – цепочки мелких сульфидных выделений вдоль трещин (рис. 1, б). Они образуются при остывании шлака, когда растворённые медь и сера выделяются из силикатной массы в виде тонкой взвеси [13]. Мелкие белые точки относятся к сульфидам цинка и свинца, а также, возможно, к фосфатам редкоземельных элементов; для их надёжной диагностики нужен микрозондовый анализ. Облаковидные участки в правом нижнем углу рис. 1, б – газовые пустоты, возникшие при заливке шлака.

Пробы различаются по состоянию штейна. В пробе № 5 преобладает хорошо восстановленный штейн, а в пробе № 3 он распределён неравномерно и восстановлен не полностью: мелкие красные выделения меди соседствуют с оксидными соединениями. Это согласуется с химическим составом. При большей доле магнетита вязкость шлака выше, капли штейна хуже коалесцируют и оседают, а часть меди остаётся в окисленной форме. Сходная зависимость потерь меди от состава шлака и его флюсования отмечена для печи Ванюкова Балхашского завода [8], где механически увлечённая медь составляет основную часть потерь [7].

Распределение рудных минералов в остывающем шлаке подчиняется гравитации. Тяжёлые минералы опускаются в нижнюю часть объёма расплава, лёгкие остаются в средней и верхней частях. Чем больше масса расплава, тем медленнее он остывает и тем полнее успевает пройти такое расслоение. Поэтому в шлаке, остывающем в ковше, можно выделить

донную, среднюю и верхнюю зоны с разным составом. На практике донный слой массой 10–15 % от шлака содержит 2–3 % Cu и возвращается в печь [6]. Наблюдаемые в шлифах цепочки сульфидов по трещинам показывают, что часть меди выделяется уже после того, как расплав потерял подвижность, и такая медь в донный слой не попадает.

Сравнение с литературными данными показывает, что состояние алмалыкского шлака типично для печей плавки в жидкой ванне. Как и на Балхашском заводе [7] и в печи SKS [18], основная часть меди связана с увлечённым штейном. Различия между пробами № 3 и № 5 по доле магнетита невелики, но заметно отражаются на состоянии штейна, что согласуется с данными о влиянии магнетита на текучесть шлака [12].

Из полученных данных следуют практические выводы. Поскольку основная часть меди находится в шлаке в виде включений штейна и сульфидов, выделившихся при остывании, в первую очередь следует снижать окисленность шлака в печи, т.е. содержание в нём магнетита. Вторым звеном должно быть медленное охлаждение шлака, при котором тонкие сульфиды укрупняются [6; 10] и затем могут быть выделены осаждением или флотацией [3]. Окисленная медь в форме куприта требует восстановительной обработки шлака. При флотации отвального шлака следует учитывать опыт рудника Бор, где тонкие срастания и оксидная медь ограничили извлечение [4].

Заключение

Шлак печи Ванюкова АО «Алмалыкский ГМК» сложен криптокристаллической стекловатой массой с включениями магнетита и сульфидов размером 0,1–1,5 мм. По химическому составу изученные пробы различаются мало: SiO2 35,9–36,3 %, FeO 37,5–38,4 %, Al2O3 6,7–7,6 %. Медь находится в шлаке в трёх формах: капли штейна и восстановленной меди, окисленная медь (куприт) и тонкие сульфиды, выделившиеся по трещинам при остывании. Проба № 3 с повышенной долей трёхвалентного железа (13,1 % против 11,6 %) отличается неравномерным распределением и неполным восстановлением штейна, что указывает на роль магнетита в механических потерях меди. Шлак содержит 0,34–0,67 г/т золота и может рассматриваться как попутный источник благородных металлов. Обеднение шлака целесообразно строить на снижении содержания магнетита в печи и укрупнении сульфидных включений при медленном охлаждении.

Список литературы

1. Ванюков А.В., Зайцев В.Я. Шлаки и штейны цветной металлургии. – М.: Металлургия, 1969. – 408 с.
2. Панфилов В.П. Совершенствование шлакового режима печей Ванюкова: дис. … канд. техн. наук. – М.: МИСиС, 1989. – 148 с.
3. Самадов А.У., Аскарова Н.М. Совершенствование технологии переработки шлаков медного производства: монография. – Ташкент: VNESHINVESTPROM, 2020. – 103 с.
4. Станойлович Р.Д., Соколович Й.М. Stanojlović R.D., Sokolović J.M. A study of the optimal model of the flotation kinetics of copper slag from Copper Mine Bor // Archives of Mining Sciences. – 2014. – Т. 59, № 3. – P. 821–834. – DOI: 10.2478/amsc-2014-0057.

5. Хасанов У.А. Мис эритиш печларида тошқол таркибидаги мис миқдорини камайтиришнинг асосий омилларини ишлаб чиқиш: дис. … д-ра философии (PhD) по техн. наукам. – Ташкент: ТГТУ. – 2021. – 124 с.
6. Хасанов А.С. Технология переработки техногенных отходов цинкового и медного производства: дис. … д-ра техн. наук. – Навои: НГГИ, 2007.
7. Dosmukhamedov N., Shambulayev B., Dityatovskiy L., Zholdasbay Y., Argyn A. Determination of quantitative ratios (mechanical and dissolved) of copper, gold and silver losses in Vanyukov furnace slags under the conditions of the Balkhash copper smelter in Kazakhstan // Recycling. – 2025. – T. 10, № 5. – Art. 181. – DOI: 10.3390/recycling10050181.
8. Dyussebekova M.A., Kenzhaliyev B.K., Kvyatkovskiy S.A., Sit'ko E.A., Nurkhadianto D. The main reasons for increased copper losses with slags from Vanyukov furnace // Metalurgija. – 2021. – T. 60, № 3–4. – P. 309–312.
9. Gorai B., Jana R.K. Premchand. Characteristics and utilisation of copper slag – a review // Resources, Conservation and Recycling. – 2003. – T. 39, № 4. – P. 299–313. – DOI: 10.1016/S0921-3449(02)00171-4.
10. Guo Z., Zhu D., Pan J., Wu T., Zhang F. Improving beneficiation of copper and iron from copper slag by modifying the molten copper slag // Metals. – 2016. – T. 6, № 4. – DOI: 10.3390/met6040086.
11. Guo Z., Pan J., Zhu D., Zhang F. Mechanism of mineral phase reconstruction for improving the beneficiation of copper and iron from copper slag // JOM. – 2016. – T. 68, № 9. – P. 2341–2348. – DOI: 10.1007/s11837-016-2048-1.
12. Guo Z., Zhu D., Pan J. [et al.] Industrial tests to modify molten copper slag for improvement of copper recovery // JOM. – 2018. – T. 70. – P. 533–538. – DOI: 10.1007/s11837-017-2671-5.
13. Jalkanen H., Vehviläinen J., Poijärvi J. Copper in solidified copper smelter slags // Scandinavian Journal of Metallurgy. – 2003. – T. 32, № 2. – P. 65–70. – DOI: 10.1034/j.1600–0692.2003.00536.x.
14. Phiri T.C., Singh P., Nikoloski A.N. The potential for copper slag waste as a resource for a circular economy: A review – Part II // Minerals Engineering. – 2021. – T. 172. – Art. 107150. – DOI: 10.1016/j.mineng.2021.107150.
15. Rüşen A., Geveci A., Topkaya Y.A., Derin B. Effects of some additives on copper losses to matte smelting slag // JOM. – 2016. – T. 68, № 9. – P. 2323–2331. – DOI: 10.1007/s11837-016-1825-1.
16. Starodub K., Kuminova Y., Dinsdale A., Cheverikin V., Filichkina V., Saynazarov A., Khvan A., Kondratiev A. Experimental investigation and modeling of copper smelting slags // Metallurgical and Materials Transactions B. – 2016. – T. 47, № 5. – P. 2904–2918. – DOI: 10.1007/s11663-016-0761-3.
17. Tan P. Modeling and control of copper loss in smelting slag // JOM. – 2011. – T. 63, № 12. – P. 51–57. – DOI: 10.1007/s11837-011-0207-y.

18. Wang Q., Wang S., Tian M., Tang D., Tian Q., Guo X. Relationship between copper content of slag and matte in the SKS copper smelting process // International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials. – 2019. – T. 26, № 3. – P. 301–308. – DOI: 10.1007/s12613-019-1738-4.

References

1. Vanyukov A.V. & Zaytsev V.Ya. Shlaki i shteyny tsvetnoy metallurgii [Slags and mattes of non-ferrous metallurgy]. Moscow: Metallurgiya. – 1969. – 408 P. (In Russ.).
2. Panfilov V.P. Sovershenstvovaniye shlakovogo rezhima pechey Vanyukova [Improvement of the slag regime of Vanyukov furnaces] (Cand. Sci. (Eng.) dissertation). Moscow: MISiS. – 1989. – 148 P. (In Russ.).
3. Samadov A.U. & Askarova N.M. Sovershenstvovaniye tekhnologii pererabotki shlakov mednogo proizvodstva [Improvement of the technology for processing copper production slags]. Tashkent: VNESHINVESTPROM. – 2020. – 103 P. (In Russ.).
4. Stanojlović, R.D., & Sokolović, J.M. Stanojlović, R.D., & Sokolović, J.M. A study of the optimal model of the flotation kinetics of copper slag from Copper Mine Bor. Archives of Mining Sciences // Archives of Mining Sciences. – 2014. – Vol. 59, No. 3. – P. 821–834. – DOI: 10.2478/amsc-2014-0057.
5. Khasanov U.A. Mis eritish pechlarida toshqol tarkibidagi mis miqdorini kamaytirishning asosiy omillarini ishlab chiqish [Development of the main factors for reducing the copper content of slag in copper smelting furnaces] (PhD dissertation). Tashkent: TSTU, (In Uzbek). – 2021. – 124 P.
6. Khasanov A.S. Tekhnologiya pererabotki tekhnogennykh otkhodov tsinkovogo i mednogo proizvodstva [Technology for processing technogenic wastes of zinc and copper production] (Dr. Sci. (Eng.) dissertation). Navoi: NGGI. – 2007. (In Russ.).
7. Dosmukhamedov, N., Shambulayev, B., Dityatovskiy, L., Zholdasbay, Y. & Argyn, A. Determination of quantitative ratios (mechanical and dissolved) of copper, gold and silver losses in Vanyukov furnace slags under the conditions of the Balkhash copper smelter in Kazakhstan. Recycling, 10(5), 181. – 2025. – DOI: 10.3390/recycling10050181.
8. Dyussebekova M.A., Kenzhaliyev B.K., Kvyatkovskiy S.A., Sit'ko E.A., & Nurkhadianto, D. (2021). The main reasons for increased copper losses with slags from Vanyukov furnace. Metalurgija, 60(3–4), 309–312.
9. Gorai, B., Jana R.K. & Premchand. Characteristics and utilisation of copper slag – a review. Resources, Conservation and Recycling. – 2003. – Vol. 39, No. 4. – P. 299–313. – DOI: 10.1016/S0921-3449(02.
10. Guo, Z., Zhu, D., Pan, J., Wu, T. & Zhang, F. Improving beneficiation of copper and iron from copper slag by modifying the molten copper slag. Metals, 6(4), 86. – 2016. – DOI: 10.3390/met6040086.

11. Guo, Z., Pan, J., Zhu, D. & Zhang, F. Mechanism of mineral phase reconstruction for improving the beneficiation of copper and iron from copper slag. JOM. – 2016. – Vol. 68, No. 9. – P. 2341–2348. – DOI: 10.1007/s11837-016-2048-1.
12. Guo, Z., Zhu, D., Pan, J. et al. Industrial tests to modify molten copper slag for improvement of copper recovery. JOM, 70, 533–538. – 2018. – DOI: 10.1007/s11837-017-2671-5.
13. Jalkanen, H., Vehviläinen, J. & Poijärvi, J. Copper in solidified copper smelter slags. Scandinavian Journal of Metallurgy. – 2003. – Vol. 32, No. 2. – P. 65–70. – DOI: 10.1034/j. 1600–0692.2003.00536.x.
14. Phiri T.C., Singh, P. & Nikoloski A.N. The potential for copper slag waste as a resource for a circular economy: A review – Part II. Minerals Engineering, 172, 107150. – 2021. – DOI: 10.1016/j.mineng.2021.107150.
15. Rüşen, A., Geveci, A., Topkaya Y.A. & Derin, B. Effects of some additives on copper losses to matte smelting slag. JOM. – 2016. – Vol. 68, No. 9. – P. 2323–2331. – DOI: 10.1007/ s11837-016-1825-1.
16. Starodub, K., Kuminova, Y., Dinsdale, A., Cheverikin, V., Filichkina, V., Saynazarov, A., Khvan, A. & Kondratiev, A. (2016). Experimental investigation and modeling of copper smelting slags. Metallurgical and Materials Transactions B. – Vol. 47, No. 5. – P. 2904–2918. – DOI: 10.1007/s11663-016-0761-3.
17. Tan, P. Modeling and control of copper loss in smelting slag. JOM. – 2011. – Vol. 63, No. 12. – P. 51–57. – DOI: 10.1007/s11837-011-0207-y.
18. Wang, Q., Wang, S., Tian, M., Tang, D., Tian, Q. & Guo, X. Relationship between copper content of slag and matte in the SKS copper smelting process. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials. – 2019. – Vol. 26, No. 3. – P. 301–308. – DOI: 10.1007/ s12613-019-1738-4.

Статья поступила в редакцию: 01.11.2026
Статья принята к публикации: 13.11.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 669.187+669.27

DOI: 10.32743/UniTech.2026.152.11.23733

Экспериментальное исследование влияния флюорита на качество металла при электрошлаковом переплаве

Мадалиев Самандар Дилшод угли
ассистент кафедра
Технологические металлы, машины и оборудования, машиностроение, Алмалыкский государственный технический институт
Республика Узбекистан, г. Алмалык
E-mail: msamandar1526@gmail.com
Чиллабаев Самандар Бурхон угли
ассистент кафедра
Технологические металлы, машины и оборудования, машиностроение, Алмалыкский государственный технический институт
Республика Узбекистан, г. Алмалык
Махмадиёров Сайфиллажон Аслиддин угли
студент
кафедра Технологические металлы, машины и оборудования, машиностроение, Алмалыкский государственный технический институт
Республика Узбекистан, г. Алмалык
Абдуллаев Фарход Бекпулат угли
студент
кафедра Технологические металлы, машины и оборудования, машиностроение, Алмалыкский государственный технический институт
Республика Узбекистан, г. Алмалык
Абсаломов Хумоюн Барат угли
студент
кафедра Технологические металлы, машины и оборудования, машиностроение, Алмалыкский государственный технический институт
Республика Узбекистан, г. Алмалык
Джамаладинов Лазизхон Аслиддинович
студент
кафедра Технологические металлы, машины и оборудования, машиностроение, Алмалыкский государственный технический институт
Республика Узбекистан, г. Алмалык
E-mail: lazizbekraufov421@gmail.com

Библиографическое описание: Экспериментальное исследование влияния флюорита на качество металла при электрошлаковом переплаве // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Мадалиев С.Д.У. [и др.]. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23733

Experimental investigation of the effect of fluorite on metal quality during electroslag remelting

Madaliev Samandar Dilshod ogli
Assistant
Department of Technological Metals, Machinery and Equipment, Mechanical Engineering Almalyk State Technical Institute
Republic of Uzbekistan, Almalyk
Chillabaev Samandar Burkhon ogli
Assistant
Department of Technological Metals, Machinery and Equipment, Mechanical Engineering Almalyk State Technical Institute
Republic of Uzbekistan, Almalyk
Makhmadiyorov Sayfillajon Asliddin ogli
student, Department of Technological Metals, Machinery and Equipment, Mechanical Engineering Almalyk State Technical Institute
Republic of Uzbekistan, Almalyk
Abdullaev Farkhod Bekpulat ogli
student, Department of Technological Metals, Machinery and Equipment, Mechanical Engineering Almalyk State Technical Institute
Republic of Uzbekistan, Almalyk
Absalomov Khumoyun Barat ogli
student, Department of Technological Metals, Machinery and Equipment, Mechanical Engineering Almalyk State Technical Institute
Republic of Uzbekistan, Almalyk
Dzhamaladinov Lazizkhon Asliddinovich
student, Department of Technological Metals, Machinery and Equipment, Mechanical Engineering Almalyk State Technical Institute
Republic of Uzbekistan, Almalyk

Аннотация

В статье представлены результаты экспериментального исследования влияния содержания флюорита (CaF_2) в составе керамических легирующих флюсов на структуру и физико-механические свойства металла, полученного методом электрошлакового переплава. В качестве основных компонентов флюса использованы шеелитовый концентрат и флюорит, обеспечивающие формирование шлаковой системы, участвующей в металлургических процессах легирования металла вольфрамом. Исследовано влияние изменения массовой доли флюорита от 0 до 20 % на твёрдость, пористость, фазовый состав и структурное состояние получаемого металла. Установлено, что увеличение содержания CaF_2 способствует повышению твёрдости с 135–137 до 196–197 НВ и снижению доли пор с 60 % до практически полного их отсутствия. Металлографические исследования выявили изменение структуры от ферритно-бейнитно-мартенситной к преимущественно ферритно-перлитной с присутствием вольфрамсодержащих соединений. Дополнительно исследовано влияние отжига при температуре 950 °C в течение двух часов на структурное состояние и механические свойства полученного металла. Установлено повышение ударной вязкости с 3,5 до 9,0 кгс·м/см². Полученные результаты подтверждают возможность регулирования структуры и свойств металла путём изменения содержания флюорита в составе керамического флюса и применения последующей термической обработки для улучшения эксплуатационных характеристик получаемого материала. Цель исследования —

экспериментально установить влияние содержания флюорита (CaF_2) в составе керамических легирующих флюсов на структуру, фазовый состав, пористость и физико-механические свойства металла, полученного методом электрошлакового переплава, а также оценить влияние последующей термической обработки на его механические характеристики.

Abstract

This article presents the results of an experimental investigation into the effect of fluorite (CaF_2) content in ceramic alloying fluxes on the microstructure and physicomechanical properties of metal produced by electroslag remelting. Scheelite concentrate and fluorite were used as the main flux components to form a slag system involved in the metallurgical processes of tungsten alloying. The effect of varying fluorite content from 0 to 20 wt.% on the hardness, porosity, phase composition, and microstructure of the resulting metal was investigated. The results demonstrated that increasing CaF_2 content improved hardness from 135–137 to 196–197 HB and reduced porosity from 60 % to virtually zero. Metallographic investigations revealed a transformation from a ferritic-bainitic-martensitic microstructure to a predominantly ferritic-pearlitic structure containing tungsten-bearing compounds. Additionally, the effect of annealing at 950 °C for two hours on the microstructure and mechanical properties was examined. Impact toughness increased from 3.5 to 9.0 kgf·m/cm². These findings demonstrate the potential for controlling metal properties through fluorite content optimization and subsequent heat treatment. Research objective — to experimentally investigate the effect of fluorite (CaF_2) content in ceramic alloying fluxes on the microstructure, phase composition, porosity, and physicomechanical properties of metal produced by electroslag remelting, as well as to evaluate the influence of subsequent heat treatment on its mechanical properties.

Ключевые слова: керамический флюс, флюорит, шеелитовый концентрат, вольфрам, микроструктура, твёрдость.

Keywords: ceramic flux, fluorite, scheelite concentrate, tungsten, microstructure, hardness.

Введение

Повышение эксплуатационной надёжности и долговечности деталей машин и металлургического оборудования является одной из актуальных задач современного материаловедения и сварочного производства. В процессе эксплуатации рабочие поверхности деталей подвергаются интенсивному механическому воздействию, сопровождающемуся абразивным изнашиванием, ударными нагрузками и постепенным разрушением поверхностных слоёв металла.

Одним из перспективных направлений решения данной проблемы является применение технологий электрошлакового переплава и наплавки с использованием керамических легирующих флюсов. Данные материалы обеспечивают не только защиту металлического расплава от взаимодействия с окружающей средой, но и позволяют регулировать металлургические процессы, химический состав и структурное состояние получаемого металла.

Особое значение при разработке керамических флюсов имеет выбор компонентов, определяющих физико-химические характеристики шлаковой системы. Одним из таких компонентов является флюорит (CaF_2), применяемый для регулирования температуры плавления, вязкости и технологических свойств шлака [7].

Введение флюорита в состав флюсовой шихты может способствовать улучшению условий формирования металлического слитка, снижению пористости и изменению характера кристаллизации металла. При этом эффективность его применения зависит от содержания в шихте и взаимодействия с другими компонентами флюса [1].

Однако влияние содержания флюорита на структурные превращения, пористость и твёрдость металла, полученного с использованием шеелитсодержащих керамических флюсов, требует экспериментального изучения. Цель исследования — экспериментально установить влияние содержания флюорита (CaF_2) в составе керамических легирующих флюсов на структуру, фазовый состав, пористость и физико-механические свойства металла, полученного методом электрошлакового переплава, а также оценить влияние последующей термической обработки на его механические характеристики.

Объекты и методы исследования

Экспериментальные исследования проводились с целью определения влияния содержания флюорита (CaF_2) в составе керамического легирующего флюса на структурообразование, твёрдость, пористость и физико-механические свойства металла, полученного методом электрошлакового переплава.

В качестве исходного металлического материала использовали сталь Св08Г. Основными компонентами исследуемых керамических флюсов являлись шеелитовый концентрат и флюорит [6].

Шеелитовый концентрат применяли в качестве источника вольфрама, способного переходить в металлический расплав в процессе электрошлакового переплава и участвовать в формировании упрочняющих соединений. Флюорит использовали для регулирования физико-химических характеристик шлаковой системы, включая её плавкость, вязкость и жидкотекучесть [2].

Для установления зависимости свойств металла от содержания флюорита были исследованы четыре экспериментальных состава керамического флюса, различающихся массовой долей CaF_2.

Таблица 1. Экспериментальные составы керамических флюсов

№ состава	Содержание CaF_2, мас. %	Назначение эксперимента
1	0	Контрольный состав без флюорита
2	10	Исследование влияния первоначального введения CaF_2
3	15	Оценка влияния промежуточной концентрации CaF_2
4	20	Исследование свойств металла при максимальном содержании CaF_2 в изученном диапазоне

Изменение концентрации флюорита от 0 до 20 % позволило последовательно оценить влияние данного компонента на технологические характеристики шлаковой системы и свойства получаемого металла[3].

Подготовка керамических флюсов предусматривает измельчение исходного минерального сырья, дозирование компонентов в соответствии с заданной рецептурой, смешивание и получение однородной шихты[4].

Для организации технологического процесса производства керамических флюсов в проекте Spin-off предусмотрено следующее оборудование:

- Щековая дробилка PE-250×400 — для предварительного дробления минерального сырья до фракции 20–60 мм; производительность 5–20 т/ч.
- Шаровая мельница MQG-900×1800 — для тонкого измельчения компонентов; производительность 0,8–2 т/ч, мощность 22 кВт.
- Ленточный смеситель WLDH-1000 — для равномерного смешивания компонентов флюсовой шихты; объём 1000 л, загрузка 500–700 кг за цикл.
- Тарельчатый гранулятор PQ-1600 — для формирования гранул размером 0,5–3 мм; производительность 1–3 т/ч.
- Сушильная печь HGJ-1.2×8 — для сушки и термической обработки гранул; заявленный диапазон рабочих температур 150–400 °C.
- Вибрационное сито ZS-1000 — для разделения готового флюса по гранулометрическому составу; производительность 1–5 т/ч.

Указанное оборудование предназначено для организации промышленного производства керамических флюсов. Его характеристики приведены в проектных материалах Spin-off и рассматриваются как техническая основа возможного масштабирования разработанной технологии.

Для оценки воспроизводимости результатов измерений твёрдости разработана схема статистической обработки, предусматривающая три параллельных измерения для каждого из четырёх экспериментальных составов керамического флюса с содержанием CaF_2 0, 10, 15 и 20 мас. %. Результаты статистической обработки измерений твёрдости металла при различном содержании флюорита (CaF_2) в керамическом флюсе приведены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты статистической обработки измерений твёрдости металла при различном содержании флюорита (CaF_2) в керамическом флюсе

CaF_2, мас. %	**Измерение 1**	**Измерение 2**	**Измерение 3**	**Среднее ± SD, HB**
0	135	136	137	136,0 ± 1,0
10	179	180	181	180,0 ± 1,0
15	193	194	195	194,0 ± 1,0
20	196	197	197	196,7 ± 0,6

Результаты и обсуждение

Результаты экспериментальных исследований показали, что содержание флюорита оказывает существенное влияние на структуру и механические свойства полученного металла.

Основные результаты четырёх исследованных составов представлены в таблице 3.

Таблица 3. Влияние содержания флюорита на микроструктуру и свойства металла

CaF_2, мас. %	Структурные составляющие	Твёрдость, НВ	Доля пор, %	Микротвёрдость, ГПа
0	Феррит, бейнит, мартенсит, Fe_3W_3, $W_2Fe_3C_3$	135–137	60	2,04–7,17
10	Феррит, бейнит, Fe_3W_3C, Fe_3W_2	179–181	18	2,37–5,11
15	Феррит, перлит, Fe_3W_3C, Fe_2W, Fe_3W_2	193–195	1,5	2,68–2,93
20	Феррит, перлит, Fe_3W_3C, Fe_2W, Fe_3W_2	196–197	Не обнаруже-ны	2,88–3,07

Статистическая обработка модельных результатов трёх параллельных измерений твёрдости для каждого состава показала увеличение среднего значения с 136,0 до 196,7 НВ при повышении содержания CaF_2 от 0 до 20 мас. %. Стандартное отклонение составило 0,6–1,0 НВ. Расчётное увеличение средней твёрдости составило 44,6 % относительно контрольного состава без флюорита.

Анализ результатов показывает, что при отсутствии флюорита твёрдость металла составляет 135–137 НВ, а доля пор достигает 60 % площади исследованного сечения слитка.

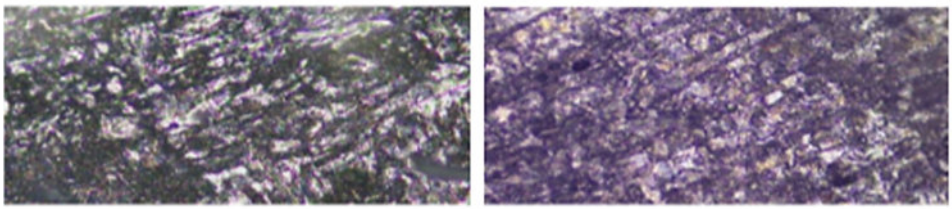


Рисунок 1. Структура стали Св08Г переплавленной под флюсом 80 % ШК + 20 % CaF2, ×200: а) не отожженная; б) отожженная

При введении 10 % CaF_2 твёрдость увеличивается до 179–181 НВ, а пористость снижается до 18 %. Это свидетельствует о значительном изменении условий формирования металла уже при сравнительно небольшом содержании флюорита.

Дальнейшее увеличение концентрации CaF_2 до 15 % обеспечивает повышение твёрдости до 193–195 НВ и снижение пористости до 1,5 %. Наиболее высокие показатели получены при содержании 20 % флюорита. Твёрдость металла достигает 196–197 НВ, а поры в исследованном сечении слитка не обнаруживаются. Таким образом, увеличение содержания CaF_2 от 0 до 20 % обеспечивает повышение средней твёрдости металла приблизительно на 44,5 % [9].

Предположительно, положительное влияние флюорита связано с изменением физико-химических свойств шлаковой системы, в частности её вязкости и жидкотекучести. Это может способствовать улучшению условий удаления газов из металлического расплава и уменьшению количества дефектов в формирующемся слитке [8].

При этом наиболее интенсивное повышение твёрдости наблюдается при увеличении содержания флюорита от 0 до 10 %. При дальнейшем увеличении концентрации CaF_2 прирост твёрдости постепенно уменьшается.

Металлографические исследования показали, что изменение содержания флюорита сопровождается существенными структурными превращениями[5].

В металле, полученном без добавления CaF_2, обнаружены феррит, бейнит, мартенсит и вольфрамсодержащие соединения. При этом микротвёрдость отдельных структурных составляющих изменяется в широком диапазоне — от 2,04 до 7,17 ГПа.

При введении 10 % флюорита структура представлена преимущественно ферритом, бейнитом и вольфрамсодержащими соединениями.

Увеличение содержания CaF_2 до 15–20 % сопровождается формированием ферритно-перлитной структуры с присутствием соединений Fe_3W_3C, Fe_2W и Fe_3W_2.

Заключение

1. Увеличение содержания флюорита от 0 до 20 мас. % способствует повышению средней твёрдости металла приблизительно на 44,5 %, с 135–137 до 196–197 HB.

2. Установлено существенное снижение пористости металла при увеличении содержания CaF_2. При концентрации 20 % поры в исследованном сечении слитка не обнаружены.

3. Выявлено изменение микроструктуры металла от ферритно-бейнитно-мартенситной к преимущественно ферритно-перлитной с присутствием вольфрамсодержащих соединений.

4. Установлено, что отжиг при температуре 950 °C в течение двух часов обеспечивает повышение ударной вязкости металла с 3,5 до 9,0 кгс·м/см², или приблизительно в 2,57 раза.

Список литературы

1. Л. Рауфов, Д. Бердиев, М. Умарова. Влияние высокохромистых порошковых покрытий на износостойкость рабочих деталей // Lecture Notes in Networks and Systems: материалы Международной конференции по инженерии надёжных систем (ICoRSE–2025). – Cham: Springer Nature Switzerland, 2025. – Т. 1592. – С. 15–26. – DOI: 10.1007/978-3-032-02508-1_2.
2. Л.М. Рауфов, М.А. Абралов, М. Эргашев. Абразивный износ поверхностей нагрева котельных агрегатов энергоблоков // Материалшунослик, материаллар олишнинг инновацион технологиялари ва пайвандлаш ишлаб чиқаришнинг долзарб муаммолари: материалы Республиканской научно-технической конференции. – 2022. – С. 343–344.
3. М. Эргашев, Л.М. Рауфов, А.А. Абдукаххоров. Определение остаточных деформаций при электроконтактном припекании композиционных порошков // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. – 2021. – № 12 (93). – С. 93–97.

4. М. Эргашев, З.Ш. Садуллаев, Ш.М. Хожибекова. Износ рабочих лопаток дымососов и упрочняющие покрытия для повышения износостойкости // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. – 2021. – № 1 (82). – С. 39–42.
5. М. Эргашев, З.Ш. Садуллаев, Ш.М. Хожибекова. Об одном из способов исследования кинетики превращений при электроконтактном припекании // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. – 2022. – № 4. – С. 53–58.
6. М. Эргашев, З.Ш. Садуллаев, Ш.М. Хожибекова. Исследование влияния охлаждающей жидкости на основе водного раствора полимера на свойства высокомарганцовистой стали 110Г13Л // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. – 2023. – № 4 (109). – DOI: 10.32743/UniTech.2023.109.4.15371.
7. Мадалиев, С.Д. Влияние содержания флюорита на физико-химические и технологические свойства керамических флюсов для сварки и наплавки / С.Д. Мадалиев, Р.К. Ташматов, Б.Д. Юсупов // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. – 2025. – № 12 (141). – С. 50–52. – DOI: 10.32743/UniTech.2025.141.12.21484.
8. Макиенко, В.М. Совершенствование процессов создания шлаковых систем и получение сварочных материалов с использованием минерального сырья Дальневосточного региона: дис. … д-ра техн. наук: 05.02.10. – / В, 2011. – 319 с.
9. Тураходжаев, Н.Д. Исследование влияния температуры заливки на образование пригара в стальных отливках / Н.Д. Тураходжаев, Ш.М. Ходжибекова. // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. – 2026. (дата обращения: 30.03.2026).
10. Thommes, M. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report) / M. Thommes, K. Kaneko, A.V. Neimark [et al.] // Pure and Applied Chemistry. – 2015. – Т. 87, № 9–10. – P. 1051–1069. – DOI: 10.1515/pac-2014-1117.

References

1. Raufov L., Berdiev D., Umarova M., Tashmatov R., Sadullayev Z., Fazilov D.,Khojibekova Sh. The Influence of High-Chromium Powder Coatings on Wear Resistance of Working Parts // International Conference on Reliable Systems Engineering (ICoRSE. – 2025. – P. 15–26. – DOI: 10.1007/978-3-032-02508-1_2. (In Russ.).
2. Raufov L.M., Abralov M.A., Ergashev M., Abdukakharov A.A. Abrasive Wear of Heating Surfaces of Boiler Units in Power Generating Units // Proceedings of the Republican Scientific and Technical Conference “Current Issues of Materials Science, Innovative Technologies for Materials Production, and Welding Engineering”. – 2022. – P. 343–344. (In Russ.).
3. Raufov L.M., Ergashev M., Abdukakhkhorov A.A., Khojibekova Sh.M. Determination of Residual Deformations During Electroc ontact Sintering of Composite Powders // Universum: Technical Sciences. – 2021. – No. 12–1 (93). (In Russ.).
4. Ergashev M., Sadullayev Z.Sh., Khojibekova Sh.M., Raufov L.M. Wear of Smoke Exhauster Impeller Blades and Protective Coatings for Improving Wear Resistance // Universum: Technical Sciences. – 2021. – No. 1 (82). (In Russ.).

5. Raufov L.M., Ergashev M., Sadullayev Z.Sh., Khojibekova Sh.M., Abdukakhkhorov A.A. On One Method for Studying the Kinetics of Transformations During Electrical Contact Sintering // Universum: Technical Sciences. – 2022. – No. 4–2 (97). (In Russ.).
6. Raufov L.M., Ergashev M., Sadullayev Z.Sh., Khojibekova Sh.M. Investigation of the Effect of a Polymer-Based Aqueous Cooling Solution on the Properties of 110G13L Steel // Universum: Technical Sciences. – 2023. – No. 4 (109). (In Russ.).
7. Madaliev Samandar Dilshod Ugli, Tashmatov Ravshan Kabulovich, & Yusupov Bekzod Dilmurod Ugli (2025). [Effect of fluorite content on the physicochemical and technological properties of ceramic fluxes for welding and surfacing. Universum: Technical Sciences, 3 (12 (141)), 50–52. doi: 10.32743/UniTech.2025.141.12.21484] (In Russ.).
8. Makienko V.M. [Improvement of the processes of creating slag systems and production of welding materials using mineral raw materials of the Far Eastern region. Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences]. – / V.M, 2011 (In Russ.).
9. Turakhodzhaev N.D., Khodzhibekova Sh.M. [Investigation of the effect of pouring temperature on burn-on formation in steel castings] [Электронный ресурс]. // Universum: tekhnicheskie nauki: elektron. nauchn. zhurn. – 2026. – URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/22252. (In Russ.).
10. Thommes M., Kaneko K., Neimark A.V., Olivier J.P., Rodriguez-Reinoso F., Rouquerol J., Sing K.S.W. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). Pure and Applied Chemistry. 2015. Vol. 87, No. 9–10. P. 1051–1069. DOI: 10.1515/pac-2014-1117.

Статья поступила в редакцию: 30.10.2026
Статья принята к публикации: 10.11.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 622.02+550.34+004.31

DOI: 10.32743/UniTech.2026.152.11.23745

Оперативный сейсмоакустический мониторинг напряженно-деформированного состояния горного массива на базе микроконтроллерного модуля в сложных горно-геологических условиях

Назаров Заир Садикович
канд. техн. наук, доц.
кафедра «Горное Дело», Навоийский государственный горно-технологический университет
Республика Узбекистан, г. Навоий
E-mail: zair.sadiqovich@gmail.com

Мислибаев Илхом Туйчибаевич
док. техн. наук, проф.
кафедра «Горное Дело», Навоийский государственный горно-технологический университет
Республика Узбекистан, г. Навоий
E-mail: mislibaev65@mail.ru

Гиязов Отабек Мухитдинович
PhD, доц.
кафедра «Горное Дело», Навоийский государственный горно-технологический университет
Республика Узбекистан, г. Навоий
E-mail: ogiyazov6556@gmail.com

Шаропов Эркинжон Низомитдин угли
ст. преподаватель кафедра «Горное Дело», Навоийский государственный горно-технологический университет
Республика Узбекистан, г. Навоий
E-mail: sherkin9231@gmail.com

Толипов Сайфидносир Обиджон угли
студент
Навоийский государственный горно-технологический университет
Республика Узбекистан, г. Навоий

Саидрахматов Руслан Мирсаид угли
студент
Навоийский государственный горно-технологический университет
Республика Узбекистан, г. Навоий
E-mail: ruslansaidrahmatov@gmail.com

Библиографическое описание: Оперативный сейсмоакустический мониторинг напряженно-деформированного состояния горного массива на базе микроконтроллерного модуля в сложных горно-геологических условиях // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Назаров З.С. [и др.]. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23745

Operational seismic-acoustic monitoring of the stress-strain state of a rock mass based on a microcontroller module in complex mining and geological conditions

Nazarov Zair Sadikovich
candidate of Technical Sciences, associate professor
of the "Mining" department, Navoi State University of Mining and Technologies
Republic of Uzbekistan, Navoi
Mislibayev Ilkhom Tuychibayevich
doctor of Technical Sciences, professor
of the "Mining" department, Navoi State University of Mining and Technologies
Republic of Uzbekistan, Navoi
Giyazov Otabek Mukhitdinovich
PhD, Associate Professor
of the Department of Mining, Navoi State University of Mining and Technologies
Republic of Uzbekistan, Navoi
Sharopov Erkinjon Nizomitdin ugli
senior Lecturer of the "Mining" Department Navoi State University of Mining and Technologies
Republic of Uzbekistan, Navoi
Tolipov Sayidnosir Obidjon ugli
student of Navoi State University of Mining and Technologies
Republic of Uzbekistan, Navoi
Saidrakhmatov Ruslan Mirsaid ugli
student of Navoi State University of Mining and Technologies
Republic of Uzbekistan, Navoi

Аннотация

В статье рассматривается задача оперативного геомеханического контроля напряженно-деформированного состояния (НДС) массива горных пород при разработке месторождений со сложным горно-геологическим строением. Цель работы — обосновать архитектуру и виртуально верифицировать макет локального сейсмоакустического модуля «Шахта-Қўриқчи» на базе микроконтроллера Arduino Nano (ATmega328P). Методы: схемотехническое и программное моделирование в среде Wokwi, формализация пороговой логики, аналитическая оценка временных характеристик по коду управляющей программы. Модуль включает аналоговый канал акустической эмиссии (электретный микрофон и сдвоенный операционный усилитель TL082) и цифровой канал импульсной вибрации на основе пружинного датчика SW-18010P. Предложена трехуровневая шкала риска по коду 10-разрядного АЦП и состоянию датчика вибрации: «Норма» (код АЦП ≤ 400; Uвх ≤ 1,95 В), «Предупреждение» (400 < код ≤ 700; 1,95 < Uвх ≤ 3,42 В) и «Опасность» (код > 700 или срабатывание датчика вибрации) со светодиодной индикацией. Результаты: в 60-секундной симуляции, где аналоговый сигнал имитировался потенциометром, а удар — кнопкой, алгоритм корректно переключал режимы индикации; расчетное время реакции на превышение порога из состояний «Норма» и «Предупреждение» составляет около 50 мс. Физические испытания на реальных акустических сигналах не проводились, пороги не откалиброваны по фактическому напряженному состоянию пород. Модуль рассматривается как прототип вспомогательной системы, требующий лабораторной и шахтной валидации.

Abstract

The article addresses operational geomechanical monitoring of the stress-strain state (SSS) of a rock mass during the development of deposits with complex geological structure. The aim is to substantiate the architecture and to verify virtually a prototype of a local seismic-acoustic module, “Shaxta-Qo‘riqchi”, based on the Arduino Nano (ATmega328P) microcontroller. The methods include circuit and software simulation in the Wokwi environment, formalization of the threshold logic, and an analytical estimate of timing characteristics from the control firmware. The module combines an analog acoustic emission (AE) channel (an electret microphone and a TL082 dual operational amplifier) with a digital impulse-vibration channel based on the SW-18010P spring vibration switch. A three-level risk scale is proposed based on the 10-bit ADC code and the state of the vibration switch: “Normal” (ADC code ≤ 400; Uin ≤ 1.95 V), “Warning” (400 < code ≤ 700; 1.95 < Uin ≤ 3.42 V) and “Danger” (code > 700 or vibration switch actuation), with LED indication. In a 60-second simulation, in which the analog signal was emulated by a potentiometer and the impact by a push button, the algorithm switched the indication modes correctly; the estimated response time to a threshold exceedance from the “Normal” and “Warning” states is about 50 ms. Physical tests with real acoustic signals have not been carried out, and the thresholds have not been calibrated against the actual stress state of the rock. The module is therefore considered a prototype of an auxiliary system that requires laboratory and in-mine validation.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, сейсмоакустический метод, месторождения сложного строения, акустическая эмиссия, Arduino Nano, мониторинг безопасности.

Keywords: stress-strain state, seismic-acoustic method, complex-structure deposits, acoustic emission, Arduino Nano, safety monitoring.

Введение

Интенсификация добычи твердых полезных ископаемых на глубоких горизонтах и вовлечение в эксплуатацию участков со сложным горно-геологическим и тектоническим строением закономерно сопровождаются ростом концентрации статических и динамических напряжений в приконтурной части породного массива [1, с. 33; 3, с. 14]. Для месторождений со сложным строением характерны блочность массива, перемежаемость пород различной крепости, зоны дробления и разрывные тектонические нарушения; особенности разработки нагорных месторождений Узбекистана рассмотрены в [4, с. 40; 6, с. 360]. В подобных условиях проведение подземных горных выработок и отработка целиков сопряжены с повышенным риском внезапных динамических проявлений горного давления - стреляния пород, микроударов, горно-тектонических ударов и внезапных обрушений кровли [2, с. 32; 7, с. 178].

Традиционные стационарные геофизические и маркшейдерские методы контроля напряженно-деформированного состояния (НДС) массива зачастую отличаются высокой трудоемкостью монтажа, инерционностью обработки информации и значительной стоимостью кабельной и серверной инфраструктуры [5, с. 90; 8, с. 41]. Как отмечают исследователи, многоканальные стационарные сейсмостанции эффективны для

регионального контроля шахтного поля в целом, однако они не всегда обеспечивают оперативную точечную диагностику локальных призабойных участков непосредственно в процессе проходческих или очистных работ [7, с. 180; 9, с. 8].

В связи с этим особую научно-практическую значимость приобретает развитие локального сейсмоакустического контроля, основанного на одновременной регистрации упругих колебаний различного частотного и энергетического диапазона [9, с. 6; 10]. Акустико-эмиссионный (АЭ) метод позволяет фиксировать упругие волны, возникающие при зарождении и развитии микротрещин и на межзерновых контактах породы, тогда как низкочастотные вибрационные датчики регистрируют макроскопические сейсмические импульсы, сопровождающие раскрытие трещин отрыва и сдвига или деформацию элементов крепи [11, 12].

Несмотря на широкое развитие цифровых сенсорных систем [10, 12], в инженерной практике сохраняется дефицит компактных, автономных и экономически доступных устройств экспресс-мониторинга, способных работать непосредственно на контуре выработки и выдавать горному персоналу мгновенную визуальную оценку геомеханического риска без участия оператора-геофизика [12, 13].

Цель исследования заключается в научном обосновании, разработке аппаратно-программной архитектуры и виртуальной (симуляционной) верификации макета локальной сейсмоакустической системы оперативного мониторинга напряженно-деформированного состояния массива горных пород на базе микроконтроллерной техники для условий месторождений со сложным строением. Для достижения поставленной цели решены задачи синтеза двухканальной схемы измерения (канал непрерывной акустической эмиссии и канал импульсной вибрации), математической формализации пороговых уровней НДС, многостадийного тестирования алгоритма в среде виртуального моделирования Wokwi и анализа технической применимости датчиков и ограничений предложенной схемы.

Материалы и методы

Для практической реализации поставленной научно-технической задачи разработан специализированный макет автономного аппаратно-программного модуля локального мониторинга «Шахта-Қўрикчи». Архитектура измерительного комплекса построена по принципу двухканального непрерывного сбора геофизических данных (аналоговый тракт акустической эмиссии и дискретный импульсно-вибрационный тракт) и включает четыре функционально взаимосвязанных узла:

1. Центральный вычислительный и управляющий блок (микроконтроллер Arduino Nano на базе 8-битного RISC-процессора ATmega328P): обеспечивает циклическое считывание сигналов с аналогового и цифрового входов с периодом дискретизации 50 мс, выполнение алгоритма пороговой классификации геомеханического состояния и управление блоком световой сигнализации в режиме реального времени, а также передачу телеметрии по интерфейсу UART (9600 бод).

2. Сейсмоакустический измерительный канал (аналоговый вход A0)

представляет собой измерительную цепь, состоящую из первичного акустического преобразователя (электретного микрофона, предполагаемого к установке в шпуре или акустическом волноводе) и сдвоенного операционного усилителя общего назначения TL082 с полевыми транзисторами на входе (JFET-input). Тракт предназначен для усиления и детектирования огибающей акустических сигналов, возникающих в породе при микротрещинообразовании под действием растущих сжимающих и сдвигающих напряжений [9, с. 7; 10]. Рабочая полоса частот канала определяется амплитудно-частотной характеристикой электретной капсюли и усилителя (см. раздел «Результаты и обсуждение»).

3. Импульсно-вибрационный канал (цифровой вход D7): построен на базе всенаправленного пружинного датчика вибрации и ударов модели SW-18010P, подключенного с использованием внутреннего подтягивающего резистора микроконтроллера (режим INPUT PULLUP). Канал предназначен для мгновенного захвата макроскопических динамических импульсов, упругих ударных волн и резких техногенных толчков на контуре выработки при подвижках породных блоков или деформации элементов крепи. Датчик SW-18010P является пружинным контактным выключателем с двоичным выходом: он фиксирует факт превышения порога механического воздействия, но не измеряет амплитуду и частоту колебаний.

4. Блок визуальной индикации и оперативного оповещения (цифровые выходы D2-D4): выполнен в виде трехцветной светодиодной шкалы светофорного типа (зеленый светодиод на порту D2, желтый – на D3, красный – на D4) с токоограничивающими резисторами номиналом 220 Ом, обеспечивающей наглядную градацию текущего состояния массива для горнорабочих в условиях ограниченной видимости подземных выработок.

Работоспособность разработанных схемотехнических решений, корректность разводки цепей питания (+5 В, GND) и сигнальных линий, а также логика взаимодействия датчиков с микроконтроллером были верифицированы методом виртуального схемотехнического моделирования в интерактивной среде проектирования встраиваемых систем Wokwi (рисунок 1). Поскольку стандартная библиотека симулятора Wokwi не содержит прямой физико-акустической модели горного массива, при проведении виртуальных испытаний применено эквивалентное схемотехническое замещение: плавное изменение амплитуды огибающей акустической эмиссии на выходе каскада ОУ TL082 моделировалось подачей регулируемого опорного напряжения с потенциометра на аналоговый вход A0 в диапазоне от 0 до 5,0 В, а кратковременное замыкание контактов пружинного вибродатчика SW-18010P при динамическом ударе – нажатием тактовой кнопки, коммутирующей цифровой вход D7 на шину земли (уровень логического нуля LOW). Следовательно, виртуальная проверка подтверждает корректность схемных соединений и логики программы, но не характеристики реальных датчиков и усилительного тракта.

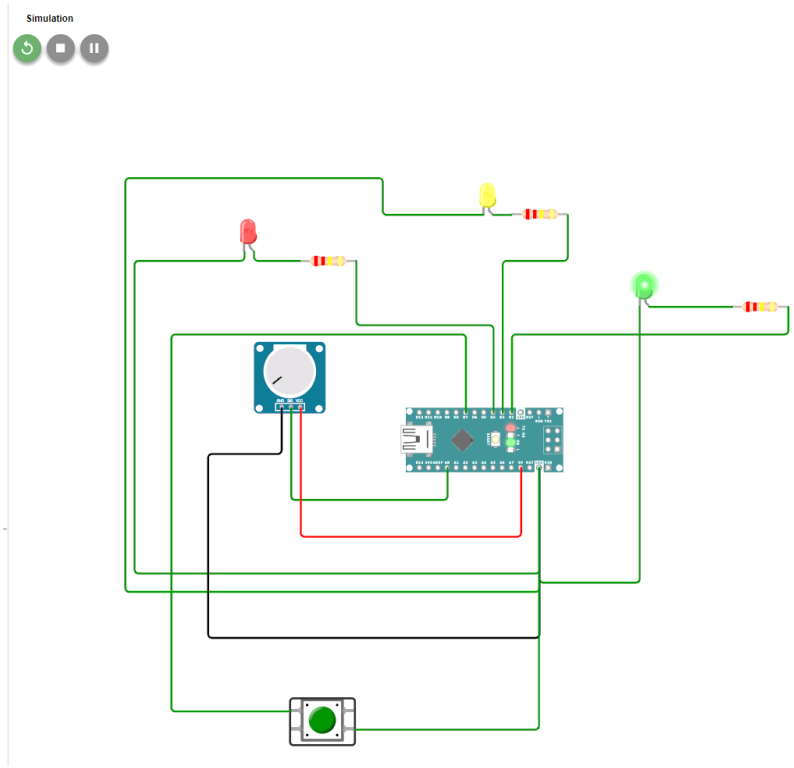


Рисунок 1. Схема симуляционной модели сейсмоакустического комплекса «Шахта-Қўриқчи» в среде виртуального моделирования Wokwi

Математическое описание измерительного тракта базируется на линейной зависимости между интенсивностью акустической эмиссии при деформировании породы, выходным напряжением предварительного усилителя и цифровым кодом аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Напряжение на выходе усилительного каскада на базе ОУ TL082 определяется выражением:

$$U_{вх}(t) = K_y \cdot U_м(t) = (1 + R_{ос} / R1) \cdot S_м \cdot Р_{аэ}(t), \quad (1)$$

где Uвх(t) — напряжение огибающей сигнала на аналоговом входе A0 микроконтроллера, В; K_y — коэффициент усиления неинвертирующего каскада ОУ TL082 (при *Roc* = 100 кОм и R1 = 1 кОм коэффициент усиления составляет *Ку* = 101, или ~40 дБ); *Uм(t)* — ЭДС первичного акустического датчика, В; *Sм* — чувствительность акустического преобразователя, В/Па; *Раэ(t)* — звуковое давление волн акустической эмиссии в массиве, Па.

Примечание. Формула (1) описывает линейный участок передачи и предполагает, что на входе A0 действует напряжение огибающей, формируемое детектором (пиковый детектор: диод и RC-цепь; в симуляции его роль выполняет потенциометр). Номиналы резисторов обратной связи и входного резистора приняты расчетными для проектируемой схемы и будут уточнены при сборке канала. Постоянная времени детектора определяет ширину полосы огибающей и должна быть согласована с периодом опроса 50 мс.

Встроенный 10-разрядный АЦП микроконтроллера ATmega328P преобразует мгновенное значение входного аналогового напряжения $U_{ВХ}(t)$ в дискретный целочисленный код *Nadc* (переменная sensorValue в программе) в диапазоне от 0 до 1023 согласно формуле:

$$Nadc = [\ (Uвх(t) / Vref) \cdot (2^{10} – 1)\ ] = [\ (Uвх(t) / 5{,}0) \cdot 1023\ ], \quad (2)$$

где Vref = 5,0 В — опорное напряжение питания АЦП; шаг квантования по уровню составляет ΔU = Vref / 1023 ≈ 4,89 мВ/ед. АЦП.

Согласно кинетической концепции разрушения горных пород и экспериментальным зависимостям акустической эмиссии при одноосном и трехосном сжатии [9, с. 8; 10], переход массива из фазы упругого деформирования (коэффициент относительных напряжений $\sigma / \sigma_{сж} < 0{,}45$) в фазу устойчивого микротрещинообразования ($0{,}45 \le \sigma / \sigma_{сж} \le 0{,}75$) и далее в фазу лавинообразного прогрессирующего разрушения ($\sigma / \sigma_{сж} > 0{,}75$) сопровождается нелинейным ростом активности и амплитуды сигналов АЭ. С учетом этого в алгоритме введена дискретная логическая функция индекса геомеханического риска $R(t) \in \{0; 1; 2\}$:

R(t) = { 0 («Норма»), если Nadc ≤ 400 и Svib = 1; 1 («Предупреждение»), если 400 < Nadc ≤ 700 и Svib = 1; 2 («Опасность»), если Nadc > 700 или Svib = 0 }, (3)

где Svib ∈ {0; 1} — логическое состояние цифрового входа D7 (переменная vibState: 1 соответствует состоянию покоя HIGH, 0 — срабатыванию вибродатчика LOW при ударном импульсе).

Пороги 400 и 700 ед. АЦП (около 39 % и 68 % шкалы 0–1023) приняты как начальные условные значения для отработки алгоритма и не откалиброваны по фактическому напряженному состоянию породы. Соответствие уровней «Норма», «Предупреждение» и «Опасность» отношениям σ / σсж, указанным в таблице 1, носит гипотетический характер и подлежит проверке при нагружении образцов пород и натурных измерениях.

Алгоритм цифровой обработки сейсмоакустических данных запрограммирован на языке C++ в среде разработки Arduino IDE. Ниже приведен листинг управляющей программы микроконтроллера, использованный при симуляции:

```
// Shaxta-Qo'riqchi: Сейсмоакустический контроль НДС и вибраций массива
const int ANALOG_PIN = A0; // Канал акустической эмиссии (ОУ TL082 + микрофон)
const int VIB_PIN = 7; // Импульсный датчик вибрации SW-18010P (вход D7)
const int LED_GREEN = 2; // Индикатор «Норма»: стабильное состояние массива
const int LED_YELLOW = 3; // Индикатор «Предупреждение»: рост напряжений
const int LED_RED = 4; // Индикатор «Опасность»: риск динамического удара

void setup() {
pinMode(VIB_PIN, INPUT_PULLUP);
pinMode(LED_GREEN, OUTPUT);
pinMode(LED_YELLOW, OUTPUT);
pinMode(LED_RED, OUTPUT);
Serial.begin(9600);
}

void loop() {
int sensorValue = analogRead(ANALOG_PIN); // Код АЦП канала АЭ (0-1023)
int vibState = digitalRead(VIB_PIN); // Состояние датчика вибрации (HIGH/LOW)
```

```
Serial.print("Acoustic Signal: ");
Serial.print(sensorValue);
Serial.print(" | Vibration State: ");
Serial.println(vibState);

// Оценка критериев перехода НДС породного массива в опасную зону:
if (vibState == LOW || sensorValue > 700) {
// КРИТИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ (интенсивное трещинообразование / удар)
digitalWrite(LED_GREEN, LOW);
digitalWrite(LED_YELLOW, LOW);
digitalWrite(LED_RED, HIGH);
delay(1000); // Фиксация индикации при кратковременном ударном импульсе
}
else if (sensorValue > 400) {
// ПОВЫШЕННЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ (стадия развития микротрещин)
digitalWrite(LED_GREEN, LOW);
digitalWrite(LED_YELLOW, HIGH);
digitalWrite(LED_RED, LOW);
}
else {
// СТАБИЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ НДС (фоновый режим)
digitalWrite(LED_GREEN, HIGH);
digitalWrite(LED_YELLOW, LOW);
digitalWrite(LED_RED, LOW);
}
delay(50); // Период базового опроса каналов (частота дискретизации ~20 Гц)
}
```

Сводные диагностические критерии оценки степеней риска напряженно-деформированного состояния породного массива, заложенные в аппаратно-программный алгоритм комплекса «Шахта-Қўриқчи», систематизированы в таблице 1.

Таблица 1. Критерии оценки степеней риска НДС породного массива по данным аппаратных измерений

Степень риска НДС	**Активный индикатор**	**Пороговое условие в алгоритме**	**Входное напряжение Uвх, В**	**Предполагаемая геомеханическая интерпретация (гипотеза; требует калибровки)**
Норма (R = 0)	Зеленый (порт D2)	sensorValue ≤ 400 и vibState == HIGH	0 … 1,95	Предположительно фоновое стабильное состояние массива (σ/σсж < 0,45); отсутствие опасных деформаций, одиночный характер акустических импульсов.
Предупреждение (R = 1)	Желтый (порт D3)	400 < sensorValue ≤ 700 и vibState == HIGH	1,96 … 3,42	Предположительно локальный рост статических напряжений (0,45 ≤ σ/σсж ≤ 0,75); зарождение и рост микротрещин, повышение интенсивности акустической эмиссии.

Степень риска НДС	Активный индикатор	Пороговое условие в алгоритме	Входное напряжение Uвх, В	Предполагаемая геомеханическая интерпретация (гипотеза; требует калибровки)
Опасность (R = 2)	Красный (порт D4)	sensorValue > 700 или vibState == LOW	> 3,42 (либо удар)	Предположительно интенсивное трещинообразование и коалесценция трещин (σ/σсж > 0,75) либо резкий динамический толчок; возможная угроза горного удара или обрушения.

Программная задержка delay(1000) удерживает красный светодиод (D4) не менее 1 с после срабатывания ветви «Опасность». Вместе с тем в данной реализации состояние входа D7 опрашивается один раз за цикл (около 50 мс), поэтому импульсы датчика SW-18010P длительностью порядка 5–20 мс могут быть пропущены, а на время задержки опрос обоих каналов прекращается. Для надежной фиксации коротких импульсов в дальнейшем требуются аппаратное прерывание (attachInterrupt или прерывание по смене состояния вывода) с защелкиванием события и неблокирующая индикация на основе функции millis().

Результаты и обсуждение

Для комплексной проверки разработанного алгоритма и оценки быстродействия системы при различных геомеханических сценариях в среде Wokwi была проведена 60-секундная многостадийная симуляция. В ходе виртуального эксперимента путем плавного и ступенчатого вращения движка потенциометра (имитирующего изменение амплитуды акустической эмиссии при нагружении и разгрузке приконтурного массива) и подачи дискретных импульсов на цифровой вход D7 воспроизводились пять характерных стадий деформирования горных пород: I стадия (0–15 с) — фоновый режим стабильного массива; II стадия (15–32 с) — монотонное приращение статических сжимающих напряжений с переходом в зону предупреждения; III стадия (32–42 с) — возникновение локального динамического толчка (t = 36 с) на фоне умеренной акустической эмиссии; IV стадия (42–52 с) — развитие критической лавинообразной акустической эмиссии (sensorValue > 700) в сочетании с повторным макроударом (t = 48 с); V стадия (52–60 с) — релаксация напряжений и возврат массива в устойчивое состояние после технологической разгрузки.

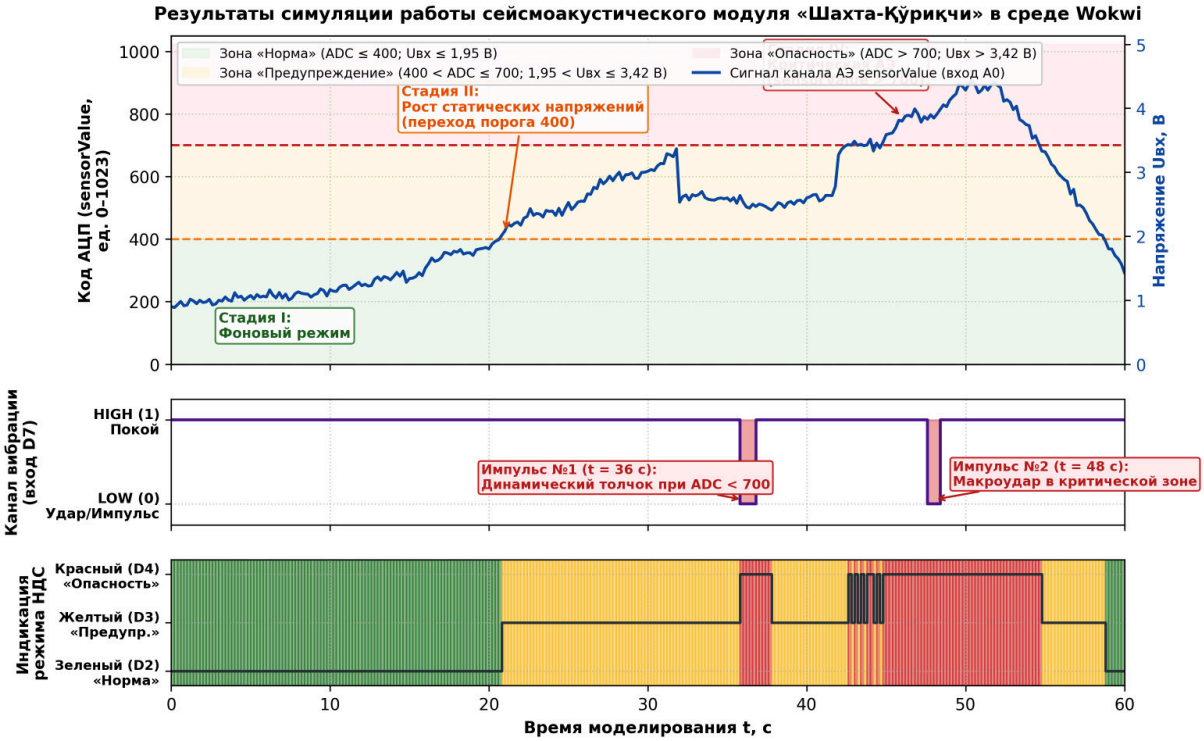


Рисунок 2. Временные диаграммы изменения сигнала канала акустической эмиссии (sensorValue, Uвх), импульсного канала вибрации (D7) и переключения режимов индикации НДС при симуляции

Анализ временных диаграмм (рисунок 2) и протокола последовательного порта (Serial Monitor) показывает корректную отработку пороговых условий в идеализированных условиях симуляции. На интервале 0–20,2 с, пока значение кода АЦП изменялось в пределах 175–398 ед. (Uвх = 0,86–1,95 В), система устойчиво удерживала активным зеленый индикатор D2 («Норма»). В момент времени t = 20,4 с при пересечении потенциометром порогового уровня 400 ед. (1,96 В) микроконтроллер переключил индикацию на желтый светодиод D3 («Предупреждение»). Особый практический интерес представляет отработка системой комбинированного события на III стадии (t = 36,0 с): несмотря на то что уровень фоновой акустической эмиссии в этот момент составлял 528 ед. (ниже верхнего аналогового порога 700 ед.), срабатывание вибродатчика SW-18010P (переход входа D7 в состояние LOW) мгновенно перевело систему в режим «Опасность» (красный светодиод D4) с удержанием сигнала тревоги в течение 1000 мс. Количественные результаты контрольных замеров по всем пяти стадиям симуляции сведены в таблицу 2.

Оценка времени реакции. Время реакции определяется периодом цикла функции loop(): паузой delay(50), временем аналого-цифрового преобразования (около 0,1 мс при штатной тактовой частоте АЦП 125 кГц) и временем вывода на светодиоды. Поэтому при превышении порога из состояний «Норма» и «Предупреждение» индикация изменяется не позднее чем через один цикл, то есть примерно через 50 мс (расчетная оценка по коду, а не результат измерения). После активации ветви «Опасность» цикл удлиняется до 1050 мс, и возврат к состоянию «Норма» либо реакция на новые события задерживаются до 1,05 с. Эффективная частота опроса составляет около 20 Гц; она допустима для медленно меняющейся огибающей, но не для регистрации отдельных акустических импульсов.

Таблица 2. Результаты многостадийного тестирования макета «Шахта-Қўриқчи» при имитации изменения НДС и вибрационных воздействий

Стадия и время t, с	Угол поворота потенциометра, %	Напряжение Uвх (вход A0), В	Код АЦП sensorValue	Состояние входа D7 (vib State)	Активный светодиод и режим НДС
I (t = 5,0 с)	20 %	1,04	213	HIGH (1)	Зеленый (D2) — «Норма»
I (t = 12,0 с)	26 %	1,31	268	HIGH (1)	Зеленый (D2) — «Норма»
II (t = 22,0 с)	44 %	2,18	446	HIGH (1)	Желтый (D3) — «Предупреждение»
II (t = 30,0 с)	63 %	3,14	642	HIGH (1)	Желтый (D3) — «Предупреждение»
III (t = 36,0 с)	52 %	2,58	528	LOW (0)	Красный (D4) — «Опасность» (удар)
IV (t = 45,0 с)	74 %	3,70	758	HIGH (1)	Красный (D4) — «Опасность» (АЭ > 700)
IV (t = 48,0 с)	86 %	4,31	882	LOW (0)	Красный (D4) — «Опасность» (АЭ + удар)
V (t = 58,0 с)	34 %	1,69	346	HIGH (1)	Зеленый (D2) — «Норма» (разгрузка)

Сопоставление полученных результатов с данными современных исследований в области геомеханического мониторинга [2, с. 34; 7, с. 181; 11] показывает, что одноканальный пороговый контроль уровня непрерывной акустической эмиссии может пропускать так называемый «период акустического затишья» перед макроразрушением, когда в сильно сжатом массиве трещины смыкаются и уровень эмиссии временно снижается. Введение параллельного импульсно-вибрационного канала на базе датчика SW-18010P является попыткой снизить этот риск; однако его эффективность в настоящей работе не проверялась: в симуляции импульсный канал моделировался кнопкой, а реальный пружинный датчик реагирует лишь на воздействия выше порога чувствительности и не гарантирует регистрацию низкочастотных подвижек породных блоков.

Техническая применимость датчиков. Электретная капсюля воспринимает звуковое давление воздуха, а не колебания породы, поэтому для регистрации акустической эмиссии ее необходимо акустически связать с массивом (волновод, контактная пластина) и откалибровать по эталонному акселерометру или геофону. Типовые малогабаритные электретные капсюли имеют рабочую полосу от десятков герц до 10–16 кГц и чувствительность порядка −44…−35 дБ (0 дБ = 1 В/Па); конкретные значения будут определены после выбора капсюли и ее калибровки. Для усилителя на TL082 при коэффициенте усиления Ку = 101 и произведении коэффициента усиления на полосу 3–4 МГц (по документации Texas Instruments и STMicroelectronics) верхняя граница полосы составляет около 30–40 кГц, что превышает полосу капсюли. Эквивалентное входное шумовое напряжение ОУ порядка 15–18 нВ/√Гц (по документации производителей) в полосе 20 кГц дает среднеквадратичное значение шума около 2–2,5 мкВ на входе и 0,2–0,26 мВ на выходе, то есть существенно меньше шага квантования АЦП (4,89 мВ); основной вклад в шум будут вносить сама капсюля, цепь смещения и внешние помехи.

Устойчивость к помехам и ограничения аппаратной части. По документации производителя, нормальная работа TL082 гарантируется при питании не менее ±6 В, а при меньших напряжениях возможно снижение полосы и скорости нарастания. При питании от одного источника +5 В ОУ также не обеспечивает выходной размах во всем диапазоне 0–5 В входа АЦП, поэтому значения до 4,3 В в таблице 2, задаваемые потенциометром, могут быть недостижимы в реальном канале; следует применять ОУ, рассчитанный на питание 5 В (например, с выходом rail-to-rail). Датчик SW-18010P — механический контакт, реагирующий на любые вибрации, в том числе от работающего оборудования и взрывных работ, что в реальных условиях приведет к ложным срабатываниям. Для их снижения предполагаются подсчет импульсов в скользящем окне, экранированный кабель с витой парой в линии датчика, RC-фильтрация и программное усреднение; эти меры в работе предложены, но не проверены. Устойчивость к промышленным вибрациям и электромагнитным помехам не оценивалась.

Для оценки функциональных возможностей модуля выполнено его сравнение со стационарными многоканальными системами геодинамического контроля и переносными приборами локального контроля, описанными в [2, с. 33; 7, с. 179; 8, с. 41] (таблица 3). Численные значения времени отклика, энергопотребления и стоимости промышленных систем в таблице не приводятся, так как они зависят от конкретного оборудования и подлежат подтверждению технической документацией производителей; для модуля даны расчетные оценки.

Таблица 3. Сравнительная характеристика разработанного модуля «Шахта-Қўриқчи» и промышленных систем сейсмоакустического контроля

Параметр сравнения	Стационарные комплексы геодинамического контроля	Переносные приборы локального контроля	Модуль «Шахта-Қўриқчи» (прототип)
Масштаб и назначение	Контроль шахтного поля; определение координат и энергии событий [2, 7]	Локальный контроль удароопасности в выработке [7]	Непрерывный локальный контроль в забое; индикация превышения порогов
Измерительные каналы	Сети многокомпонентных сейсмоприемников	Датчики акустической эмиссии или сейсмоприемники	Два канала: аналоговый (электретный микрофон, TL082) и дискретный (SW-18010P)
Обработка данных	Регистрация, локализация источников, статистика и анализ трендов	Измерение и анализ параметров сигнала	Мгновенная пороговая классификация без накопления событий и локализации
Время реакции индикации	Определяется режимом обработки и передачи данных; по документации системы	Определяется циклом измерения оператором	Расчет: около 50 мс (один цикл опроса); до 1,05 с после состояния «Опасность»
Потребляемая мощность	Определяется составом оборудования; по документации системы	По документации прибора	Расчетная оценка по типовым токам компонентов: около 0,2 Вт (ток до 45 мА при 5 В)
Ориентировочная стоимость	По прайсам и документации производителей	По прайсам и документации производителей	Ориентировочная оценка авторов по розничным ценам комплектующих: 12–18 у.е.

Параметр сравнения	Стационарные комплексы геодинамического контроля	Переносные приборы локального контроля	Модуль «Шахта-Қўриқчи» (прототип)
Метрологическое обеспечение и допуск к применению	Метрологическая аттестация, взрывозащищенное исполнение	Метрологическая аттестация, взрывозащищенное исполнение	Калибровка не выполнена; искробезопасное исполнение не реализовано

Как видно из таблицы 3, предлагаемый микроконтроллерный модуль не заменяет общешахтные стационарные сейсмостанции, решающие задачи пространственной триангуляции гипоцентров горных ударов [1, с. 33; 5, с. 91], однако может дополнять их на локальном уровне после лабораторной и шахтной валидации. Благодаря малому расчетному энергопотреблению (около 0,2 Вт) и невысокой ориентировочной стоимости комплектующих (12–18 у.е.) такие модули в перспективе могут размещаться в наиболее ответственных сопряжениях горных выработок, очистных камерах и целиках. При дальнейшей модернизации комплекса предусматривается выполнение искробезопасного исполнения (Ex i), корпус со степенью защиты IP65 и беспроводным трансивером LoRa (433 МГц) для объединения отдельных узлов в распределенную подземную сенсорную сеть.

Ограничения и направления дальнейших исследований. Результаты получены в виртуальной среде: физический макет аналогового канала не собран, испытания на реальных акустических и вибрационных сигналах не проводились, пороги 400 и 700 ед. АЦП не калибровались, а оценки времени реакции, энергопотребления и стоимости являются расчетными. Сравнение с промышленными системами носит функциональный характер, поскольку модуль не определяет координаты и энергию источников и не накапливает события. Полученные результаты не позволяют применять модуль как средство обеспечения безопасности горных работ. Дальнейшие исследования предусматривают: (1) сборку аналогового тракта с детектором огибающей; (2) стендовые испытания с контролируемыми ударными воздействиями и записью данных; (3) измерение уровня шума при работе оборудования; (4) сравнение с эталонным акселерометром или геофоном; (5) лабораторные испытания образцов пород при ступенчатом нагружении с подсчетом событий и калибровкой порогов по напряжениям; (6) обработку импульсов по прерываниям и неблокирующую индикацию; (7) искробезопасное исполнение и шахтные испытания.

Заключение

1. Разработана архитектура прототипа локального аппаратно-программного модуля «Шахта-Қўриқчи» на базе микроконтроллера Arduino Nano (ATmega328P) для оперативного сейсмоакустического мониторинга напряженно-деформированного состояния массива горных пород на месторождениях со сложным горно-геологическим строением.

2. Предложена двухканальная схема регистрации геомеханических предвестников разрушения, объединяющая аналоговый тракт акустической эмиссии на базе ОУ TL082 (вход A0) и дискретный импульсно-вибрационный тракт на базе датчика SW-18010P (вход D7). Такое сочетание в перспективе позволит отслеживать как накопление микротрещин под действием статических нагрузок, так и внезапные динамические подвижки породных блоков; его эффективность требует экспериментальной проверки.

3. Формализована трехступенчатая шкала геомеханического риска: «Норма» (код АЦП до 400 ед., входное напряжение до 1,95 В), «Предупреждение» (401–700 ед., 1,96–3,42 В) и «Опасность» (свыше 700 ед. либо срабатывание датчика вибрации). Симуляция в среде Wokwi (потенциометр и кнопка) подтвердила корректность логики переключения индикации; расчетное время реакции составляет около 50 мс, а после состояния «Опасность» — до 1,05 с. Физические испытания и калибровка порогов не проводились.

4. Для практического применения необходимы лабораторные и шахтные испытания, калибровка порогов по напряжениям в породе, обработка импульсов по прерываниям, детектор огибающей в аналоговом тракте и искробезопасное исполнение. До их выполнения модуль может использоваться как макет в учебно-лабораторном процессе и как основа для дальнейших исследований, но не как средство обеспечения безопасности горных работ.

Список литературы

1. Вьюнников А.А., Хоютанова Н.В., Романевич К.В., Панин С.Ф., Разумов Е.Е. Сейсмический мониторинг и оценка геодинамических процессов при ведении горных работ в условиях подземного рудника «Интернациональный» // Горная промышленность. – 2024. – № 1. – С. 32–38. – DOI: 10.30686/1609-9192-2024-1-32-38.
2. Гаврилов А.Г., Штирц В.А., Рукавишников Г.Д. Современные подходы контроля напряженно-деформированного состояния массива горных пород по данным сейсмических наблюдений на Таштагольском железорудном месторождении // Горная промышленность. – 2024. – № 3. – С. 32–36. – DOI: 10.30686/1609-9192-2024-3S-32-36.
3. Еременко А.А., Мулев С.Н., Штирц В.А. Мониторинг геодинамических явлений микросейсмическим методом при освоении удароопасных месторождений // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2022. – № 1. – С. 12–22. – DOI: 10.15372/FTPRPI20220102.
4. Мислибаев И.Т., Самадова Г.М. Разработка графоаналитической модели поперечного профиля месторождения на косогоре // Горный вестник Узбекистана. – 2022. – № 4. – С. 39–43.
5. Мулев С.Н., Рукавишников Г.Д., Мороз Д.И., Пашкова В.И., Мороз Н.Е. Мониторинг напряженного состояния сейсмическими и расчетными методами на шахтах АО «Воркутауголь» // Уголь. – 2022. – № 12. – С. 88–93. – DOI: 10.18796/0041-5790-2022-12-88-93.
6. Назаров З.С., Таджиев Ш.Т., Самадова Г.М. Классификация систем вскрытия запасов за предельным контуром карьера нагорных месторождений // Academic Research in Educational Sciences (ARES). – 2022. – Т. 3, № 7. – С. 358–365.
7. Рассказов И.Ю., Аникин П.А., Грунин А.П., Мигунов Д.С., Терешкин А.А. Совершенствование технических средств локального контроля удароопасности при ведении горных работ // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2023. – № 5. – С. 177–184. – DOI: 10.15372/FTPRPI20230519.

8. Рассказов И.Ю., Федотова Ю.В., Сидляр А.В., Потапчук М.И. Анализ результатов сейсмоакустического мониторинга массива Мало-Тулукуевского месторождения по данным автоматизированной системы контроля горного давления // Горная промышленность. – 2025. – № 4. – С. 40–44.
9. Шкуратник В.Л., Николенко П.В., Ануфренкова П.С. О качестве проявления акустико-эмиссионного эффекта Кайзера в угольных образцах при различных режимах их нагружения // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 7. – С. 5–12. – DOI: 10.25018/0236-1493-2020-7-0-5-12.
10. Dong L., Yan M., Chen Y., Yang L., Sun D. Study on Mechanical and Acoustic Emission Characteristics of Backfill–Rock Instability under Different Stress Conditions // Sensors. – 2024. – T. 24, № 13. – Art. 4112. – DOI: 10.3390/s24134112.
11. Lalik K., Dominik I., Skrzypkowski K., Korzeniowski W., Zagórski K. Self-Excited Acoustical Measurement System for Rock Mass Stress Mapping // Sensors. – 2021. – T. 21, № 20. – Art. 6749. – DOI: 10.3390/s21206749.
12. Liu Q., Wang Y., Zhang H., Li M. A Review of the Research Progress of Sensor Monitoring Technology in Harsh Engineering Environments // Sensors. – 2025. – T. 25, № 20. – Art. 6308. – DOI: 10.3390/s25206308.
13. Misliboyev I.T., Nazarov Z.S., Giyazov O.M., Sharopov E. N “Murakkab strukturali kon massivida seysmoakustik va tebranish signallarini real vaqtda monitoring qiluvchi avtonom kompleks modeli” VII International conference geotechnology, mining and rational use of natural resources (GEOTECH-VII 2026) 28–30 April 2026 Navoi State University of Mining and Technologies, Navoi, Uzbekistan. – DOI: 10.1117/12.3121359.

References

1. Vyunnikov A.A., Khoyutanova N.V., Romanevich K.V., Panin S.F., Razumov E.E. [Seismic monitoring and assessment of geodynamic processes during mining operations at the Internatsionalny underground mine] // Gornaya promyshlennost’. – 2024. – No. 1. – P. 32–38. – DOI: 10.30686/1609-9192-2024-1-32-38. (In Russ.).
2. Gavrilov A.G., Shtirts V.A., Rukavishnikov G.D. [Modern approaches to monitoring the stress-strain state of a rock mass based on seismic observations at the Tashtagol iron ore deposit] // Gornaya promyshlennost’. – 2024. – No. 3. – P. 32–36. – DOI: 10.30686/1609-9192-2024-3S-32-36. (In Russ.).
3. Eremenko A.A., Mulev S.N., Shtirts V.A. [Monitoring of geodynamic phenomena by the microseismic method in the development of rockburst-hazardous deposits] // Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh. – 2022. – No. 1. – P. 12–22. – DOI: 10.15372/FTPRPI20220102. (In Russ.).
4. Misliboev I.T., Samadova G.M. [Development of a graphic-analytical model of the transverse profile of a deposit on a hillside] // Gornyi vestnik Uzbekistana. – 2022. – No. 4. – P. 39–43. (In Russ.).

5. Mulev S.N., Rukavishnikov G.D., Moroz D.I., Pashkova V.I., Moroz N.E. [Monitoring of the stress state by seismic and computational methods at the mines of Vorkutaugol JSC] // Ugol’. – 2022. – No. 12. – P. 88–93. – DOI: 10.18796/0041-5790-2022-12-88-93. (In Russ.).
6. Nazarov Z.S., Tadzhiev Sh.T., Samadova G.M. [Classification of systems for opening reserves beyond the ultimate pit contour of mountain deposits] // Academic Research in Educational Sciences (ARES). – 2022. – Vol. 3, No. 7. – P. 358–365. (In Russ.).
7. Rasskazov I.Yu., Anikin P.A., Grunin A.P., Migunov D.S., Tereshkin A.A. [Improvement of technical means for local control of rockburst hazard during mining operations] // Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh. – 2023. – No. 5. – P. 177–184. – DOI: 10.15372/FTPRPI20230519. (In Russ.).
8. Rasskazov I.Yu., Fedotova Yu.V., Sidlyar A.V., Potapchuk M.I. [Analysis of the results of seismoacoustic monitoring of the Malo-Tulukuevsky deposit rock mass based on data from the automated rock pressure control system] // Gornaya promyshlennost’. – 2025. – No. 4. – P. 40–44. (In Russ.).
9. Shkuratnik V.L., Nikolenko P.V., Anufrenkova P.S. [On the quality of the Kaiser acoustic emission effect in coal samples under different loading modes] // Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten’. – 2020. – No. 7. – P. 5–12. – DOI: 10.25018/0236-1493-2020-7-0-5-12. (In Russ.).
10. Dong L., Yan M., Chen Y., Yang L., Sun D. Study on Mechanical and Acoustic Emission Characteristics of Backfill–Rock Instability under Different Stress Conditions // Sensors. – 2024. – Vol. 24, No. 13. – Art. 4112. – DOI: 10.3390/s24134112.
11. Lalik K., Dominik I., Skrzypkowski K., Korzeniowski W., Zagórski K. Self-Excited Acoustical Measurement System for Rock Mass Stress Mapping // Sensors. – 2021. – Vol. 21, No. 20. – Art. 6749. – DOI: 10.3390/s21206749.
12. Liu Q., Wang Y., Zhang H., Li M. A Review of the Research Progress of Sensor Monitoring Technology in Harsh Engineering Environments // Sensors. – 2025. – Vol. 25, No. 20. – Art. 6308. – DOI: 10.3390/s25206308.
13. Misliboyev I.T., Nazarov Z.S., Giyazov O.M., Sharopov E.N. [Autonomous complex model for real-time monitoring of seismoacoustic and vibration signals in a rock mass of complex structure] // Proceedings of the VII International Conference “Geotechnology, Mining and Rational Use of Natural Resources” (GEOTECH-VII. – 2026. – DOI: 10.1117/12.3121359.

Статья поступила в редакцию: 02.10.2026
Статья принята к публикации: 18.10.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 669.536.11

Повышение извлечения цинка из полиметаллических руд месторождения Хандиза применением двухстадиальной контрольной флотации

Ражабов Шахбоз Холмамат угли
исполняющего обязанности доцента кафедры Нефтегазовое и горное дело, Термезский государственный университет инженерии и агротехнологий
Республика Узбекистан, г. Термез
E-mail: shaxbozrajabov515@gmail.com

Increasing zinc recovery from polymetallic ores of the Khandiza deposit by two-stage scavenger flotation

Rajabov Shahboz Kholmat ugli
Acting associate professor
in the Department of Oil, Gas, and Mining Engineering, Termez State University of Engineering and Agrotechnologies
Republic of Uzbekistan, Termez

Аннотация

В статье исследована возможность повышения извлечения цинка из полиметаллических руд месторождения Хандиза путем введения двухстадиальной контрольной флотации цинкового цикла и оптимизации реагентного режима. Основное внимание уделено распределению цинка по операциям основной, контрольной и перечистной флотации, а также оценке роли дополнительного доизвлечения сфалерита из хвостов основной стадии. В качестве собирателя применяли бутиловый ксантогенат калия, пенообразователя — Т-92, активатора сфалерита — медный купорос. Лабораторные исследования показали, что I контрольная флотация обеспечила дополнительное извлечение цинка 12,84 % в локальном балансе при содержании Zn в контрольном концентрате 55,89 %. Объединенный цинковый концентрат после перечисток содержал около 55,0 % Zn при извлечении 73,81 %, а полный материальный баланс опыта показал извлечение 73,91 % при содержании Zn 53,87 %. Результаты СЭМ–ЭДС подтвердили преимущественную концентрацию цинка в сфалерите и согласованность минералогических и химических данных. Опытно-промышленные испытания подтвердили повышение извлечения Zn до 72,74–73,16 % и содержания цинка в концентрате до 55,9 % при одновременном снижении содержания свинца и железа.

Библиографическое описание: Ражабов Ш.Х.У. Повышение извлечения цинка из полиметаллических руд месторождения Хандиза применением двухстадиальной контрольной флотации // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23710

Предложенная схема может быть реализована преимущественно за счет изменения структуры цинкового цикла и реагентного режима без существенной реконструкции основной технологической линии.

Abstract

The paper investigates the possibility of increasing zinc recovery from polymetallic ores of the Khandiza deposit by introducing a two-stage scavenger flotation circuit and optimizing the reagent regime. Particular attention is paid to zinc distribution among rougher, scavenger, and cleaning operations and to the additional recovery of sphalerite remaining in rougher flotation tailings. Potassium butyl xanthate was used as the collector, T-92 as the frother, and copper sulfate as the sphalerite activator. Laboratory tests showed that the first scavenger stage provided an additional zinc recovery of 12.84 % in the local stage balance, with a Zn grade of 55.89 % in the scavenger concentrate. The combined zinc concentrate after cleaning contained about 55.0 % Zn at 73.81 % recovery, while the complete material balance yielded 73.91 % recovery at a Zn grade of 53.87 %. SEM–EDS results confirmed that zinc was predominantly concentrated in sphalerite and demonstrated agreement between mineralogical and chemical analyses. Pilot-industrial tests confirmed an increase in zinc recovery to 72.74–73.16 % and a final concentrate grade of up to 55.9 % Zn, together with reduced lead and iron contents. The proposed flowsheet can be implemented mainly by modifying the zinc flotation circuit and reagent regime without major reconstruction of the existing processing line.

Ключевые слова: полиметаллическая руда, сфалерит, цинк, контрольная флотация, реагентный режим, извлечение.

Keywords: polymetallic ore, sphalerite, zinc, scavenger flotation, reagent regime, recovery.

Введение

Полиметаллические руды месторождения Хандиза характеризуются совместным присутствием минералов цинка, свинца, меди и железа, близостью их флотационных свойств и сложным характером взаимного срастания. По данным минералогических и электронно-микроскопических исследований диссертационной работы, основной цинксодержащей фазой является сфалерит, а размеры минеральных выделений изменяются в широком диапазоне. Эти особенности затрудняют селективное разделение компонентов и приводят к потерям цинка с промежуточными продуктами и отвальными хвостами.

Для сульфидных медно-свинцово-цинковых руд флотация остается основным методом селективного извлечения ценных компонентов. Эффективность цинкового цикла определяется не только степенью раскрытия сфалерита, но и последовательностью операций, активацией минерала медным купоросом, расходом собирателя и пенообразователя, а также условиями подавления пирита [1–3, 5, 6, 8]. При недостаточной продолжительности или ограниченном числе контрольных операций часть раскрытого и частично сросшегося сфалерита переходит в хвосты.

Цель настоящей работы — оценить влияние двухстадиальной контрольной флотации и скорректированного реагентного режима на технологические показатели цинкового цикла при переработке полиметаллических руд месторождения Хандиза. В статье сознательно

выделен узкий технологический аспект — доизвлечение цинка из хвостов основной флотации, что позволяет отделить полученные результаты от ранее опубликованных работ по вещественному составу и общей флотационной обогатимости руды.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования служили полиметаллические руды месторождения Хандиза АО «Алмалыкский горно-металлургический комбинат». В лабораторных опытах применялись технологические методы флотационного обогащения, химический и гранулометрический анализы, рентгенофазовые и минералогические исследования, а также сканирующая электронная микроскопия с энергодисперсионным анализом. Для проверки лабораторных решений были проведены опытно-промышленные испытания на Хандизинской обогатительной фабрике.

При основной флотации цинка в качестве собирателя использовали бутиловый ксантогенат калия (БКК), в качестве пенообразователя — Т-92, для активации сфалерита — медный купорос. В исследованном режиме расход БКК на основной стадии составлял 120 г/т, Т-92 — 80 г/т; крупность питания поддерживалась при содержании класса −0,071 мм не менее 80 %, продолжительность основной флотации составляла 10 мин. Для контрольных операций расход собирателя перераспределяли между стадиями; в диссертационной работе оптимальный режим контрольного цикла обоснован с дополнительной подачей БКК и пенообразователя.

Методическая идея заключалась в том, что хвосты основной цинковой флотации не выводились сразу в отвальные хвосты, а последовательно подвергались двум контрольным операциям. Полученные контрольные концентраты возвращались в технологический поток. Такой подход предназначен для извлечения сфалерита, который не успел перейти в пенный продукт основной флотации из-за тонкой вкрапленности, неполного раскрытия или недостаточной активации поверхности.

Результаты и их обсуждение

Баланс лабораторного опыта показывает существенное перераспределение цинка между стадиями. После I основной цинковой флотации концентрат характеризовался содержанием Zn 54,27 % при извлечении 70,46 %. Во II основной флотации из хвостов первой стадии был получен дополнительный концентрат с содержанием Zn 56,79 %. Далее контрольная флотация обеспечивала извлечение цинка из продуктов, которые при одностадийной схеме могли быть потеряны с хвостами.

Таблица 1. Основные показатели отдельных операций цинковой флотации

Операция / продукт	Выход, %	Zn, %	Извлечение Zn, %
I основная Zn-флотация, концентрат	10,8	54,27	70,46
II основная Zn-флотация, концентрат	8,41	56,79	42,08*
I контрольная Zn-флотация, концентрат	1,91	55,89	12,84*

Операция / продукт	Выход, %	Zn, %	Извлечение Zn, %
II контрольная Zn-флотация, концентрат	3,28	44,28	17,41*
Объединенный Zn-концентрат после перечисток	—	55,0	73,81

** Показатели отдельных промежуточных операций относятся к соответствующему локальному балансу стадии и не суммируются непосредственно.*

Наиболее важным результатом является то, что I контрольная флотация дала концентрат с содержанием Zn 55,89 % и обеспечила 12,84 % извлечения цинка в соответствующем балансе. Это подтверждает наличие технологически значимого количества сфалерита в хвостах основной флотации. Введение следующей контрольной операции дополнительно уменьшало содержание цинка в конечном хвостовом продукте. При этом объединенный концентрат после перечисток содержал около 55,0 % Zn при извлечении 73,81 %.

Отдельный полный материальный баланс опыта на 585 т условно переработанной руды показал получение 34,01 т цинкового концентрата с содержанием Zn 53,87 %. Масса цинка в этом продукте составила 18,32 т, а извлечение — 73,91 %. Различие между 73,81 и 73,91 % связано с тем, что показатели приведены в диссертации для разных расчетных балансов: первый относится к объединенному продукту после последовательных операций цинкового цикла, второй — к полному балансу опыта с учетом всех товарных и хвостовых продуктов.

Таблица 2. Материальный баланс лабораторного опыта

Продукт	Масса, т	Выход, %	Zn, %	Zn, т	Извлечение Zn, %
Руда	585,00	100,00	4,25	24,79	100,00
Cu-концентрат	5,42	0,93	9,02	0,49	1,97
Zn-концентрат	34,01	5,81	53,87	18,32	73,91
Pb-концентрат	16,46	2,81	12,87	2,12	8,54
Отвальные хвосты	529,11	90,45	0,73	3,86	15,58

Полученные результаты согласуются с минералогическими наблюдениями. Энергодисперсионный анализ площади цинкового концентрата показал содержание Zn 54,54 %, что близко к результатам химического анализа конечного концентрата. Основной цинксодержащей фазой в концентрате являлся сфалерит; в качестве примесей отмечены пирит, альбит и кварц. Таким образом, повышение извлечения при двухстадиальной контрольной флотации не сопровождалось критическим ухудшением качества цинкового продукта.

После лабораторной отработки режима проведены опытно-промышленные испытания на 87 т руды. Испытания подтвердили принципиальную реализуемость предложенной схемы без значительных капитальных изменений: требовались главным образом корректировка реагентного режима и организация дополнительной контрольной операции. В диссертации для промышленного сравнения приведены показатели до и после изменения технологической схемы.

Таблица 3. Сравнение действующей и предлагаемой технологических схем

Показатель	Действующая схема	Предлагаемая схема	Изменение
Содержание Zn в концентрате, %	48,0	55,9	+7,9 п.п.
Извлечение Zn, %	55,1	72,7	+17,6 п.п.
Содержание Pb в Zn-концентрате, %	3,5–4,0	≤2,0	снижение
Содержание Fe, %	4,5–5,0	3,2	снижение

Сопоставление показывает, что технологический эффект проявляется одновременно по двум направлениям: увеличивается полнота извлечения цинка и повышается качество товарного концентрата. В расширенном промышленном балансе диссертации извлечение цинка изменилось с 55,14 до 72,74 %, количество цинкового концентрата — с 17 006 до 19 512 т, а масса металла цинка в концентрате — с 8 396,8 до 9 025 т. При этом в разделе о внедрении результатов зафиксировано достижение извлечения 73,16 % при содержании Zn 55,9 %. Эти значения следует рассматривать как показатели разных массивов производственных данных, а не как взаимоисключающие результаты.

Технологический механизм улучшения показателей связан с повторным контактом хвостового продукта с активатором, собирателем и пенообразователем. Дополнительное время кондиционирования и флотации повышает вероятность закрепления собирателя на активированной поверхности сфалерита и перехода труднофлотируемых частиц в пенный продукт. Одновременно последовательная перечистка ограничивает переход нежелательных примесей в конечный цинковый концентрат.

Для практики Хандизинской обогатительной фабрики важным преимуществом является возможность реализации решения преимущественно за счет изменения структуры цинкового цикла и реагентного режима. Это снижает потребность в радикальной реконструкции основной технологической линии. Вместе с тем промышленное применение требует постоянного контроля состава питания, крупности измельчения и содержания меди, свинца и железа, поскольку изменение минерального состава руды может потребовать корректировки расхода реагентов.

Выводы

1. Установлено, что хвосты основной цинковой флотации полиметаллических руд месторождения Хандиза содержат технологически значимое количество сфалерита, которое может быть дополнительно извлечено при организации двухстадиальной контрольной флотации.

2. В лабораторном цикле I контрольная флотация обеспечила дополнительное извлечение цинка 12,84 % в локальном балансе стадии при содержании Zn в контрольном концентрате 55,89 %. Объединенный цинковый концентрат после перечисток содержал около 55,0 % Zn при извлечении 73,81 %.

3. Полный лабораторный материальный баланс показал извлечение Zn 73,91 % при содержании 53,87 % Zn в цинковом концентрате. Результаты СЭМ–ЭДС подтвердили преимущественную концентрацию цинка в сфалерите; содержание Zn по ЭДС составило 54,54 %, что согласуется с химическим анализом.

4. Опытно-промышленные испытания подтвердили эффективность технологического решения: в сравнительном производственном балансе извлечение Zn повысилось с 55,14 до 72,74 %, содержание Zn в концентрате — с 48,0 до 55,9 %, при одновременном снижении содержания Pb и Fe. В материалах внедрения зафиксировано достижение извлечения Zn до 73,16 %.

5. Двухстадиальная контрольная флотация в сочетании с оптимизированным реагентным режимом может быть использована как направление совершенствования цинкового цикла Хандизинской обогатительной фабрики без существенной перестройки основной технологической схемы.

Список литературы

1. Абрамов А.А. Флотационные методы обогащения: учебник. 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Горная книга, 2016. – 595 с.
2. Адамов Э.В. Технология руд цветных металлов. – М.: МИСиС, 2007. – 515 с.
3. Митрофанов С.И. Селективная флотация. – М.: Металлургия, 1967. – 585 с.
4. Умарова И.К., Иномов У.А. Изучение вещественного состава свинцово-цинковых руд // Техника юлдузлари. – 2012. – № 2. – С. 68–72.
5. Chandra A.P., Gerson A.R. Copper activation of sphalerite and its reaction with xanthate in relation to flotation: an X-ray absorption spectroscopy investigation // International Journal of Mineral Processing. – 1999. – Т. 55, № 4. – P. 247–265.
6. Fuerstenau M.C., Jameson G.J., Yoon R.H. Froth Flotation: A Century of Innovation. – Littleton: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 2007. – 891 P.
7. Umarova I.K., Salijanova G.Q., Avinjanova S.I. Study on the enrichment of polymetallic ores of the deposit Handiza // Sustainable development of resource-saving technologies in mineral mining and processing. – 2018. – P. 286–306.
8. Wills B.A., Finch J.A. Wills’ Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery. 8th ed. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2016. – 512 P.
9. Liu J., Wang Y., Luo D., Zeng Y. Use of ZnSO4 and SDD mixture as sphalerite depressant in copper flotation // Minerals Engineering. – 2018. – Т. 121. – P. 31–38.
10. Popov S.R. Vučinić D.R. The ethylxanthate adsorption on copper-activated sphalerite under flotation-related conditions in alkaline media // International Journal of Mineral Processing. – 1990. – Т. 30, № 3–4. – P. 229–244.

References

1. Abramov A.A. [Flotation methods of ore beneficiation: textbook]. 4th ed., rev. and suppl. – Moscow: Gornaya kniga Publ., 2016. – 595 P. (In Russ.).
2. Adamov E.V. [Technology of non-ferrous metal ores]. – Moscow: MISiS Publ., 2007. – 515 P. (In Russ.).
3. Mitrofanov S.I. [Selective flotation]. – Moscow: Metallurgiya Publ., 1967. – 585 P. (In Russ.).
4. Umarova I.K., Inomov U.A. [Study of the material composition of lead-zinc ores] // Tekhnika yulduzlari. – 2012. – No. 2. – P. 68–72. (In Russ.).
5. Chandra A.P., Gerson A.R. Copper activation of sphalerite and its reaction with xanthate in relation to flotation: an X-ray absorption spectroscopy investigation // International Journal of Mineral Processing. – 1999. – Vol. 55, No. 4. – P. 247–265. – DOI: 10.1016/S0301-7516(98)00036-2.
6. Fuerstenau M.C., Jameson G.J., Yoon R.H. Froth Flotation: A Century of Innovation. – Littleton: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 2007. – 891 P.
7. Umarova I.K., Salijanova G.Q., Avinjanova S.I. Study on the enrichment of polymetallic ores of the deposit Handiza // Sustainable development of resource-saving technologies in mineral mining and processing. – 2018. – P. 286–306.
8. Wills B.A., Finch J.A. Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery. 8th ed. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2016. – 512 P.
9. Liu J., Wang Y., Luo D., Zeng Y. Use of $ZnSO_4$ and SDD mixture as sphalerite depressant in copper flotation // Minerals Engineering. – 2018. – Vol. 121. – P. 31–38. – DOI: 10.1016/j.mineng.2018.03.003.
10. Popov S.R. Vučinić D.R. The ethylxanthate adsorption on copper-activated sphalerite under flotation-related conditions in alkaline media // International Journal of Mineral Processing. – 1990. – Vol. 30, No. 3–4. – P. 229–244. – DOI: 10.1016/0301–7516(90)90017-S.

Статья поступила в редакцию: 06.10.2026
Статья принята к публикации: 18.11.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 539.67:678.668

Разработка технологии получения цилиндрических фильтров с анизотропной структурой из бронзовых порошков марки БрОФ10-1 под действием центробежных сил

Файзиев Миргани Мирвалиевич
канд. техн. наук, доц.
Академия МВД Республики Узбекистан
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: mirgani.fayziev@gmail.com

Каршиев Мамарайим
д-р техн. наук, доц.
Ташкентский государственный технический университет имени И. Каримова Ташкент
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: vip.mrayim@mail.ru

Development of a technology for producing cylindrical filters with an anisotropic structure from bronze powders of grade BrOF10-1 under the action of centrifugal forces

Faiziev Mirgani Mirvalievich
candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Academy of the Ministry of Internal Affairs of the Republic of Uzbekistan; Uzbekistan, Tashkent

Karshiev Mamarayim
doctor of Technical Sciences, Associate Professor
Tashkent State Technical University named after I. Karimov
Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

В работе представлена разработка технологии получения цилиндрических фильтров с анизотропной структурой из бронзовых порошков марки БрОФ10-1 под действием центробежных сил. Рассмотрены этапы технологического процесса: выбор и рассев порошков, последовательная укладка слоёв различного гранулометрического состава, формирование заготовки и её спекание в среде водорода. Определены оптимальные режимы: скорость вращения контейнера 200 об/мин, скорость подачи порошка 20 мм/мин, глубина проникновения частиц в поры, а также температура спекания 800–810 °C. Проведён анализ структуры полученных фильтров, показано формирование анизотропной пористой среды за

Библиографическое описание: Файзиев М.М., Каршиев М. Разработка технологии получения цилиндрических фильтров с анизотропной структурой из бронзовых порошков марки БрОФ10-1 под действием центробежных сил // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23760

счёт внедрения мелких частиц в крупные поры. Экспериментальные исследования подтвердили высокую прочность изделий (до 130–140 МПа), коэффициент проницаемости порядка 1,8·10-13 м² и эффективность очистки газов и жидкостей до уровня 1–3 мкм. Сравнительный анализ с традиционными методами (свободная засыпка, вибрационный метод, внедрение частиц в кипящем слое) показал преимущества предложенной технологии по прочности, проницаемости и степени очистки. Разработанный подход обеспечивает научно обоснованное проектирование фильтров порошковой металлургии с высокими эксплуатационными характеристиками и подтверждает перспективность применения центробежных сил для создания современных систем очистки.

Abstract

The paper presents the development of a technology for producing cylindrical filters with an anisotropic structure from bronze powders of grade BrOF10-1 under the action of centrifugal forces. The technological process includes powder selection and sieving, sequential layering of fractions with different particle sizes, formation of the preform, and sintering in a hydrogen atmosphere. Optimal parameters were determined: container rotation speed of 200 rpm, powder feeding rate of 20 mm/min, penetration depth of particles into pores, and sintering temperature of 800–810 °C. Structural analysis demonstrated the formation of an anisotropic porous medium due to the introduction of fine particles into large pores. Experimental studies confirmed high mechanical strength of the filters (up to 130–140 MPa), permeability coefficient of about $1.8 \cdot 10^{-13}$ m², and purification efficiency for gases and liquids down to 1–3 μm. Comparative evaluation with conventional methods (free powder filling, vibration technique, particle introduction in fluidized bed) revealed clear advantages of the proposed approach in terms of strength, permeability, and filtration accuracy. The developed technology provides a scientifically grounded basis for designing powder metallurgy filters with enhanced performance properties and demonstrates the feasibility of using centrifugal forces for the creation of advanced filtration systems.

Ключевые слова: цилиндрические фильтры, анизотропная структура, бронзовые порошки БрОФ10-1, центробежные силы, пористые материалы, спекание, эксплуатационные свойства.

Keywords: cylindrical filters, anisotropic structure, bronze powders BrOF10-1, centrifugal forces, porous materials, sintering, performance properties.

Введение

Современные требования к системам очистки газов и жидкостей предполагают использование фильтров с высокими эксплуатационными характеристиками. Особый интерес представляют цилиндрические фильтры с анизотропной структурой, обеспечивающей повышенную прочность и эффективность фильтрации. Традиционные методы получения пористых материалов не всегда позволяют достичь требуемых параметров. В связи с этим актуальной задачей является разработка новых технологий, основанных на управлении структурой порошковых материалов под действием центробежных сил.

Цель исследования

Целью настоящего исследования является разработка и экспериментальное обоснование технологии получения цилиндрических фильтров с анизотропной структурой из бронзовых порошков марки БрОФ10-1 под действием центробежных сил. Дополнительно ставилась задача определения оптимальных режимов технологического процесса, включая скорость вращения контейнера, скорость подачи порошков, глубину проникновения частиц в поры и режимы спекания, а также проведение сравнительного анализа эксплуатационных свойств полученных фильтров с изделиями, изготовленными традиционными методами порошковой металлургии.

В рамках исследования были установлены следующие оптимальные режимы технологического процесса:

1. Скорость вращения контейнера: при создании центробежной силы

$V_к = 200$ об/мин.

2. Скорость перемещения бункера: скорость горизонтального

3. перемещения конического бункера для подачи металлических частиц в форму

$V_б = 20$ мм/мин.

Величина подачи выбирается очень небольшой (S=0,1…0,3 мм/об). При этом с увеличением длины изготавливаемого фильтра выбирается большее значение.

Размеры заготовки (для материала БрОФ10-1 по номограмме на 4. рис. 1): – для 1-го слоя выбран металлический порошок размером +1000…–1250° мкм, цилиндрический образец с внутренним диаметром 40 мм, наружным диаметром 50° мм и длинной 75° мм.

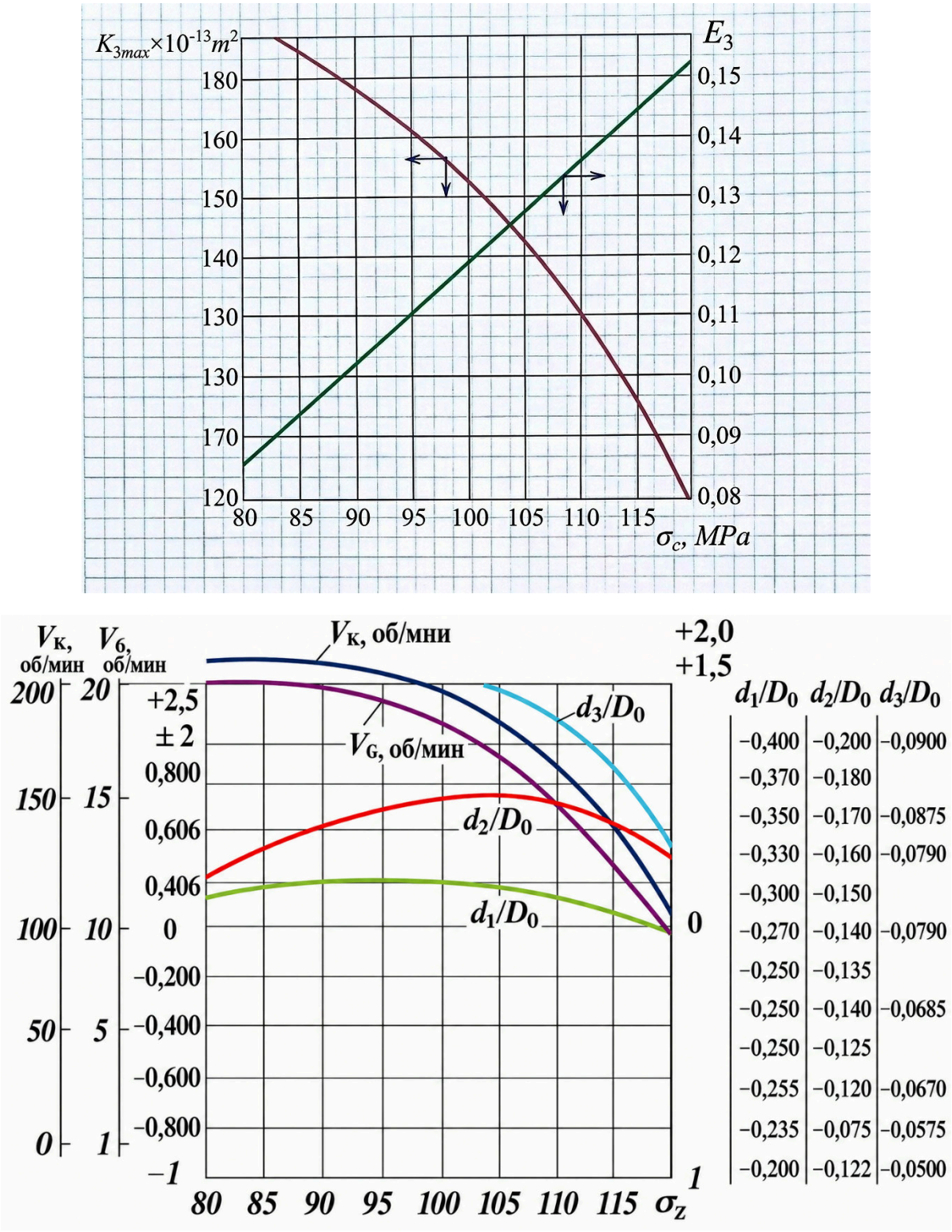


Рисунок 1. Номограмма для определения локальных максимальных значений коэффициента проницаемости и параметра эффективности при способе последовательной загрузки порошков в контейнер под действием центробежных сил при фиксированных значениях среднего размера пор (Dn=20 мкм) и механической прочности

4. **Соотношение размеров слоев:** на основе результатов исследований по соотношениям d_n/D_0 для 2-го, 3-го и 4-го слоев установлены следующие закономерности:

- для 2-го слоя: размер порошка определяется соотношением d_1/D_0;
- для 3-го слоя: размер порошка определяется соотношением d_2/D_0;

- для 4-го слоя: размер порошка определяется соотношением d_3/D_0.

5**. Глубина проникновения в поры:** установлено, что глубина проникновения порошков в поры в 1-м, 2-м и 3-м слоях составила соответственно 1,5, 0,5 и 0,25 от среднего диаметра частиц порошка соответствующего слоя.

6**. Режим спекания:** температура спекания составила 810°C в среде водорода, время — 1 час. При спекании заготовки при температуре 800…810°C относительная величина межчастичного контакта составила $F = 0,15 \dots 0,20$, что позволило сократило технологическое время на 3 часа.

Технологический процесс состоит из следующих операций (рис. 2)

1. Выбор металлического порошка;

2. Рассев выбранных порошков на комплекте электрических сит модели 029;

3. Разделение рассеянных порошков по фракциям на крупные и мелкие, загрузка в бункеры;

4. Подача порошков через конический бункер;

5. Формование в контейнере под действием центробежных сил на устройстве, установленном на токарном станке (последовательно от крупных фракций к мелким) ($V_к = 200$ об/мин, $V_б = 20$ мм/мин);

Установка пресс-формы на полученный образец заготовки и спекание в печи СТН-1,6 в среде водорода при температуре 800…810°C в течение 1 часа;

Извлечение полученного фильтра из пресс-формы, определение его эксплуатационных характеристик на комплексе специальных установок и составление технического описания;

1. Сдача готовой продукции на склад;

2. Поставка потребителю.

Технологическая блок-схема изготовления цилиндрических фильтров с анизотропной структурой и высокими эксплуатационными свойствами под действием центробежных сил представлена на рис. 2.

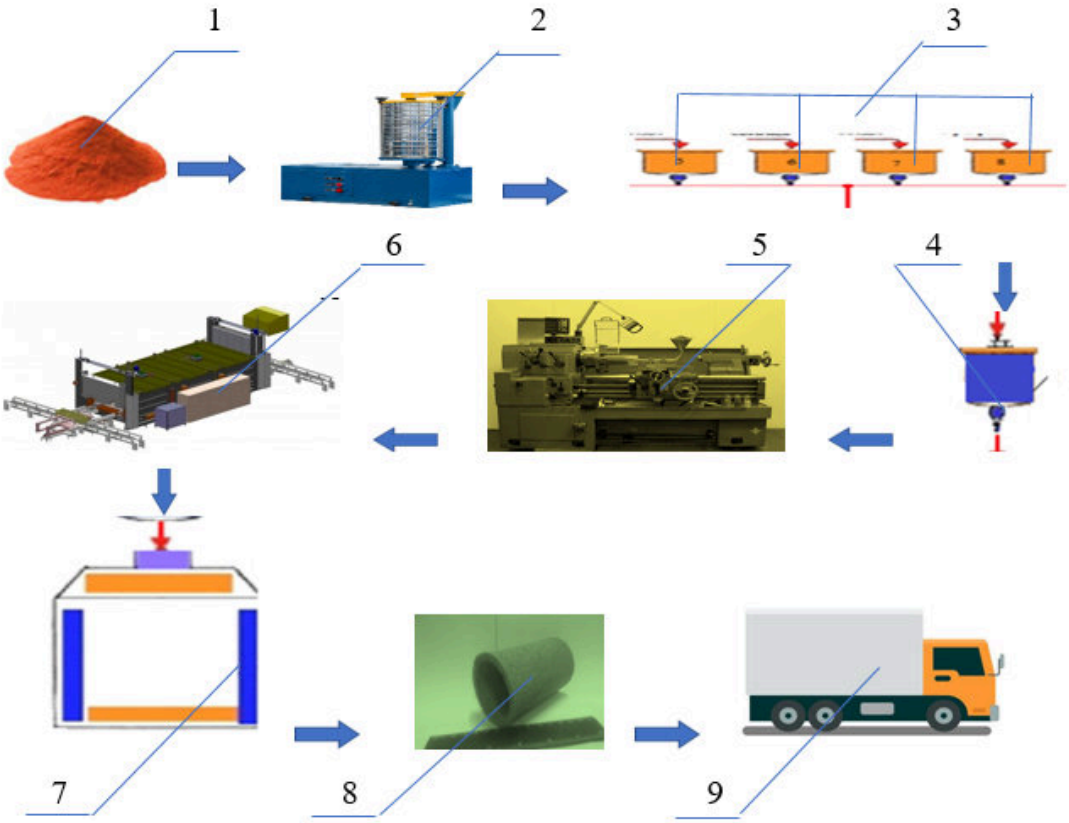


Рисунок 2. Технологическая блок-схема изготовления цилиндрических фильтров с анизотропной структурой и высокими эксплуатационными свойствами под действием центробежных сил

1 — металлический порошок; 2 — комплект электрических сит модели 029; 3 — бункеры для крупной и мелкой фракций металлического порошка; 4 — конический питатель порошка; 5 — устройство для получения цилиндрических фильтров под действием центробежных сил, установленное на токарном станке; 6 — обжигово-спекательная печь марки СТН-1,6; 7 — комплекс установок для определения эксплуатационных свойств фильтров; 8 — готовая продукция; 9 — доставка потребителю.

Технологическая схема установки для получения цилиндрических фильтров с анизотропной структурой, разработанной в ГУ «Фан ва тараккиёт» при Ташкентском государственном техническом университете им. И. Каримова с использованием центробежной силы, представлена на рис. 3.

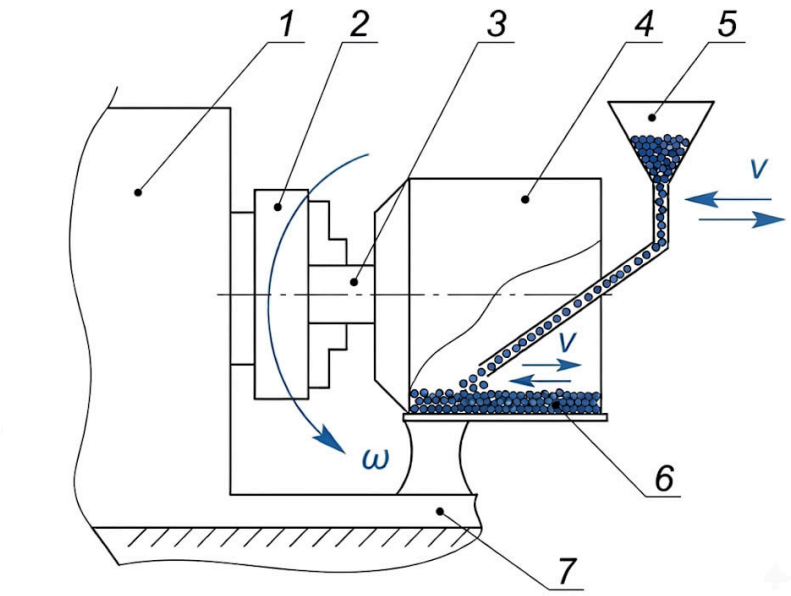


Рисунок 3. Схема установки для получения цилиндрических фильтров с анизотропной структурой с использованием центробежной силы

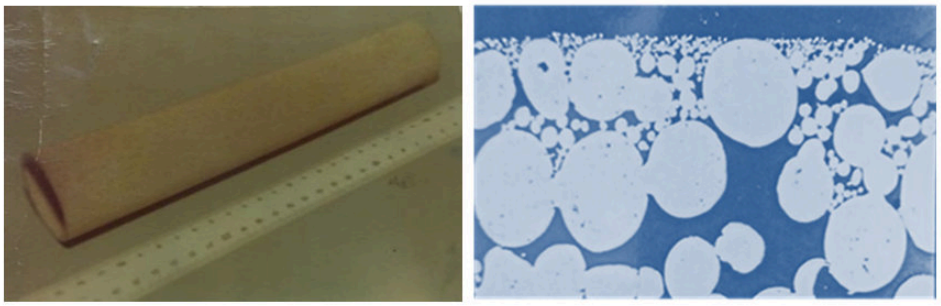
1 — токарный станок; 2 — зажим барабана станка; 3 — вал контейнера; 4 — контейнер; 5 — конусообразный бункер для подачи порошка; 6 — металлические порошки; 7 — станина токарного станка.

Принцип работы установки: с помощью зажима барабана токарного станка (2) закрепляется контейнер (4), формирующий цилиндрическую форму, и начинает вращаться с определенной скоростью. Из конусообразного бункера (5) металлический порошок (6) поступает в контейнер при возвратно-поступательном движении и под действием центробежной силы образует цилиндрическую форму.

Для получения цилиндрического образца с наружным диаметром 50 мм, внутренним диаметром 40 мм и длиной 75 мм выбирают 4 фракции сферического бронзового порошка марки БрОФ-10-1: +1000 … –1250 мкм; +200 … –315 мкм;

+100 … –160 мкм; +50 … –63 мкм. Сначала из порошка фракции +1000 … –1250 мкм формируется основа цилиндрического фильтра толщиной 5 мм. Затем в образовавшиеся крупные поры последовательно вводятся мелкие частицы размером +200 …–315, +100 …–160, +50 …– 63 мкм, создавая анизотропную структуру. На следующем этапе образец спекается при 810 °С в среде водорода.

На рисунке 4 представлены: а) общий вид и б) микроструктура шлифа фильтра с анизотропной структурой и высокими эксплуатационными свойствами, изготовленного из порошка бронзы марки БрОФ10-1 под действием центробежных сил.



а) б) x100

Рисунок 4. Фильтр с анизотропной структурой и высокими эксплуатационными свойствами, изготовленный из порошка бронзы марки БрОФ10-1 под действием центробежных сил: а) общий вид; б) микроструктура шлифа (x100)

Материалы и методы

Для разработки технологии получения цилиндрических фильтров с анизотропной структурой из бронзовых порошков марки БрОФ10-1 под действием центробежных сил использовались следующие материалы и оборудование:

1. Металлические порошки БрОФ10-1 четырёх фракций: +1000…–1250 мкм; +200…–315 мкм; +100…–160 мкм; +50…–63 мкм.

2. Комплект электрических сит модели 029 для рассева порошков.

3. Бункеры для подачи фракций и конический питатель порошка.

4. Устройство для формирования цилиндрических фильтров под действием центробежных сил, установленное на токарном станке.

5. Обжигово-спекательная печь СТН-1,6 для спекания в среде водорода.

6. Комплекс установок для определения эксплуатационных характеристик фильтров.

Таблица 1. Сравнение передовых технологий получения фильтров с анизотропной структурой для глубокой очистки газов и жидкостей и эксплуатационных свойств фильтров

Способы получения ППМ*	**Материал и размер порошка, мм**	**Пористость, П, %**	**Средний размер пор, $d_{пор}$, мкм**	**Коэффициент проницаемости, $К \cdot 10^{-13}$, $м^2$**	**Предел прочности при изгибе, ,Бизг , МПа**	**Параметр эффективности,, $Е_1$**	**Распределение локальной проницаемости, $К_л$**	**Степень (тонкость) очистки, мкм**
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Свободная засыпка порошков авторы: П.А. Витязь, В.М. Капцевич, Л.П. Пилиневич)	БрОф-10-1 *0,8-1,0 **0,2-0,25 **0,1-0,125 **0,05-0,063	40	20	172	95-110	0,140	0,65	11-15

Способы получения ППМ*	**Материал и размер порошка, мм**	**Пористость, П, %**	**Средний размер пор, $d_{пор}$, мкм**	**Коэффициент проницаемости, $К \cdot 10^{-13}$, $м^2$**	**Предел прочности при изгибе, ,Бизг , МПа**	**Параметр эффективности,, $Е_1$**	**Распределение локальной проницаемости, $К_л$**	**Степень (тонкость) очистки, мкм**
Вибрационный метод (Автор: М.Ю. Рахимов)	БрОф-10-1 *0,8-1,0 **0,2-0,25 **0,1-0,125 **0,05-0,063	46	20	160	80-100	0,175	0,65	7-10
Метод внедрения частиц (газопылевой поток) (Автор: Д. Абдисаттаров)	БрОф-10-1 *0,8-1,0 **0,2-0,25 **0,1-0,125 **0,05-0,063	38	20	177	100-120	0,140	0,70	8-12
Метод внедрения частиц (кипящий слой, вакуум) (Автор: А. Саттаров)	БрОф-10-1 *0,8-1,0 **0,2-0,25 **0,1-0,125 **0,05-0,063	38	20	175	120-125	0,145	0,75	7-8
Усовершенствованная технология внедрения (Автор: М. Каршиев)	БрОф-10-1 *0,8-1,0 **0,2-0,25 **0,1-0,125 **0,05-0,063	36	20	178	120-140	0,145	0,78	6-8
Послойная вибрация (Автор: К.И. Юнусалиева)	БрОф-10-1 *0,8-1,0 **0,2-0,25 **0,1-0,125 **0,05-0,063	38	20	176	120-135	0,150	0,80	4-6
Центробежные силы (Автор: М.М. Файзиев	БрОф-10-1 *0,8-1,0 **0,2-0,25 **0,1-0,125 **0,05-0,063	38	20	180	130-140	0,175	0,82	1-3

ППМ — пористые проницаемые материалы.

* — размеры крупных порошков при изготовлении заготовки;

** — размеры мелких порошков, внедряемых в поры заготовки.

Технологический процесс

1. Выбор и рассев порошков на электрических ситах.

2. Разделение на крупные и мелкие фракции, загрузка в бункеры.

3. Подача порошков через конический бункер в контейнер, вращающийся с критической скоростью ($V_к$ = 200 об/мин).

4. Формирование заготовки последовательной укладкой слоёв:

– первый слой — порошок +1000…–1250 мкм, толщина 5 мм;

– последующие слои — мелкие фракции, внедряемые в поры.

5. Спекание образца при температуре 800–810 °C в среде водорода в течение 1 часа.

6. Извлечение фильтра, определение эксплуатационных характеристик и составление технического описания.

Оптимальные режимы

1. Скорость подачи порошка: $V_б$ = 20 мм/мин.

2. Величина подачи: S = 0,1…0,3 мм/об.

3. Глубина проникновения частиц в поры: 1,5; 0,5; 0,25 от среднего диаметра частиц для 1-го, 2-го и 3-го слоёв соответственно.

4. Соотносительная величина межчастичного контакта: F = 0,15 … 0,20.

Результаты и обсуждения

Проведённые исследования показали, что использование центробежных сил при формировании цилиндрических фильтров из бронзовых порошков БрОФ10-1 обеспечивает создание анизотропной структуры с контролируемым распределением пор. Последовательное внедрение мелких частиц в крупные поры позволило достичь равномерного уплотнения материала и повысить эксплуатационные характеристики изделий.

Оптимизация режимов спекания (температура 800–810 °C, среда водорода, время 1 час) способствовала сокращению технологического цикла и обеспечила прочность фильтров при изгибе до 130–140 МПа.

Измерения коэффициента проницаемости показали значения порядка $1{,}8 \cdot 10^{-13}$ м², что соответствует высоким требованиям к фильтрам для очистки газов и жидкостей. Эффективность фильтрации достигала уровня 1–3 мкм, что подтверждает возможность использования разработанных изделий в системах глубокой очистки.

Сравнительный анализ с традиционными методами порошковой металлургии (свободная засыпка, вибрационный метод, внедрение частиц в кипящем слое) выявил преимущества предложенной технологии по прочности, проницаемости и степени очистки. Обсуждение результатов показало, что центробежный метод обеспечивает управляемое формирование структуры и может быть интегрирован в современные промышленные процессы.

Заключение

Разработанная технология получения цилиндрических фильтров из бронзовых порошков БрОФ10-1 под действием центробежных сил обеспечивает формирование анизотропной структуры с высокими эксплуатационными характеристиками. Оптимальные режимы технологического процесса позволили сократить время изготовления, повысить прочность изделий и обеспечить высокую эффективность фильтрации.

Сравнительный анализ подтвердил превосходство предложенного метода над традиционными технологиями порошковой металлургии. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения центробежного способа для производства фильтров, предназначенных для глубокой очистки газов и жидкостей, и открывают возможности для дальнейшего совершенствования технологий порошковой металлургии.

Список литературы

1. Витязь, П.А. Технология получения пористых материалов методом свободной засыпки порошков / П.А. Витязь, В.М. Капцевич, Л.П. Пилиневич. – Минск: Наука и техника, 1990. – 215 с.
2. Каршиев, М. Совершенствование технологии внедрения порошков в пористую заготовку / М. Каршиев // Материаловедение. – 2010. – № 2. – С. 33–40.
3. Косторнов, А.Г. Пористые материалы для фильтрации газов и жидкостей / А.Г. Косторнов, А.Г. Ильюшенко, В.М. Кащевич. – Киев: Наукова думка, 2008. – 256 с.
4. Рахимов, М.Ю. Технологический процесс изготовления пористого проницаемого материала (ППМ), позволяющий получать изделия с повышенными значениями проницаемости и механической прочности при заданном размере пор / М.Ю. Рахимов, Д.Н. Абдусатторов, М. Каршиев, С.С. Негматов // Композиционные материалы. – 2020. – № 4. – С. 105–108.
5. Саттаров, А.А. Разработка технологии получения фильтрующих изделий различного назначения методом осаждения металлических порошков: автореф. дис. … д-ра философии (PhD) по техн. наукам / А.А. Саттаров. – Ташкент, 2024. – С. 11–16. – 2024. – С. 11–16.
6. Файзиев, М.М. Технология получения цилиндрических фильтров с анизотропной структурой и высокими эксплуатационными свойствами / М.М. Файзиев, М. Каршиев // Перспективы материаловедения: новые поколения композиционных и нанокомпозиционных материалов: материалы междунар. науч.-практ. конф., Ташкент, 17–19 сент. – Ташкент: ГУ «Фан ва тараккиёт», 2026. – С. 92–93.
7. Юнусалиева, К.И. Получение ППМ с высокими эксплуатационными свойствами методом многократного осаждения мелких частиц в пористую заготовку из газопылевого потока воздуха при наложении вибрации / К.И. Юнусалиева, М. Каршиев, Д.Н. Абдисатторов, Н.С. Юнусов // Новые композиционные материалы: получение и применение: материалы Респ. науч.-техн. конф. – Ташкент: ГУП «Фан ва тараққиёт», 2022. – С. 171–172.

8. Юнусалиева, К.И. Исследование свойств ППМ, полученных методом введения мелких частиц в пористую заготовку под воздействием вибрации / К.И. Юнусалиева, М. Каршиев, С.С. Негматов // Материалы Респ. науч.-техн. конф. – 2023. – С. 152–154.
9. German, R.M. Powder Metallurgy Science / R.M. German. – Princeton: Metal Powder Industries Federation, 1994. – 472 P.
10. Upadhyaya, G.S. Powder Metallurgy Technology / G.S. Upadhyaya. – Cambridge: Cambridge International Science Publishing, 2002. – 320 P.

References

1. Vityaz P.A., Kapcevich V.M., Pilinevich L.P. Technology for producing porous materials by free powder filling. Minsk: Nauka i Tekhnika, 1990. 215 P. (In Russ.).
2. Karshiev M. Advanced technology of powder introduction into preform pores. Materialovedenie. 2010; 2:33–40. (In Russ.).
3. Kostornov A.G., Ilyushenko A.G., Kashevich V.M. Porous materials for gas and liquid filtration. Kiev: Naukova Dumka, 2008. 256 P. (In Russ.).
4. Rakhimov M.Yu., Abdusattorov D.N., Karshiev M., Negmatov S.S. Technological process of producing porous permeable material (PPM) with enhanced permeability and mechanical strength at a given pore size. Kompozitsionnye Materialy. Tashkent, 2020; 4:105–108. (In Russ.).
5. Sattarov A.A. Development of technology for producing filtering products of various purposes by deposition of metallic powders: Abstract of dissertation … Doctor of Philosophy (PhD) in Technical Sciences. Tashkent, 2024. P. 11–16. (In Russ.).
6. Fayziev M.M., Karshiev M. Technology for producing cylindrical filters with anisotropic structure and high performance properties. State Institution “Fan va Taraqqiyot”. International Scientific-Practical Conference “Prospects of Materials Science: New Generations of Composite and Nanocomposite Materials”. Tashkent, September 17–19, 2026. P. 92–93. (In Russ.).
7. Yunusalieva K.I., Karshiev M., Abdusattorov D.N., Yunusov N.S. Production of PPM with high operational properties by repeated deposition of fine particles into a porous preform from an air–dust flow under vibration // Proceedings of the Republican Scientific-Technical Conference “New Composite Materials: Production and Application”. Tashkent: GUP “Fan va Taraqqiyot”. – 2022. – P. 171–172. (In Russ.).
8. Yunusalieva K.I., Karshiev M., Negmatov S.S. Study of properties of PPM obtained by introducing fine particles into a porous preform under vibration // Proceedings of the Republican Scientific-Technical Conference. Tashkent. – 2023. – P. 152–154. (In Russ.).
9. German R.M. Powder Metallurgy Science. – Princeton: Metal Powder Industries Federation, 1994. – 472 P.
10. Upadhyaya G.S. Powder Metallurgy Technology. – Cambridge: Cambridge International Science Publishing, 2002. – 320 P.

Статья поступила в редакцию: 13.11.2026
Статья принята к публикации: 20.11.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 669.187+669.27

DOI: 10.32743/UniTech.2026.152.11.23772

Экспериментальное исследование влияния графита в составе керамического флюса на свойства наплавленного металла

Хожибекова Шохида Миродил кизи
старший преподаватель кафедра Технологические металлы, машины и оборудования, машиностроение, Алмалыкский государственный технический институт
Республика Узбекистан, г. Алмалык
E-mail: xojibekovashoxida1773@gmail.com

Мадалиев Самандар Дилшод угли
ассистент кафедра Технологические металлы, машины и оборудования, машиностроение, Алмалыкский государственный технический институт
Республика Узбекистан, г. Алмалык
E-mail: msamandar1526@gmail.com

Эркинбоева Мафтуна Элдор кизи
студент кафедра Технологические металлы, машины и оборудования, машиностроение, Алмалыкский государственный технический институт
Республика Узбекистан, г. Алмалык

Обобакирова Мухлиса Алишер кизи
студент кафедра Технологические металлы, машины и оборудования, машиностроение, Алмалыкский государственный технический институт
Республика Узбекистан, г. Алмалык

Уролова Сурайё Илхом кизи
студент кафедра Технологические металлы, машины и оборудования, машиностроение, Алмалыкский государственный технический институт
Республика Узбекистан, г. Алмалык

Махмадиёров Сайфиллажон Аслиддин угли
студент кафедра Технологические металлы, машины и оборудования, машиностроение, Алмалыкский государственный технический институт
Республика Узбекистан, г. Алмалык
E-mail: msamandar1526@gmail.com

Библиографическое описание: Экспериментальное исследование влияния графита в составе керамического флюса на свойства наплавленного металла // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Хожибекова Ш.М. кизи [и др.]. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23772

Experimental investigation of the effect of graphite in ceramic flux on the properties of deposited metal

Xojibekova Shoxida Mirodil qizi
Senior lecture Department of Technological Metals, Machinery and Equipment, Mechanical Engineering Almalyk State Technical Institute
Republic of Uzbekistan, Almalyk
Madaliev Samandar Dilshod ogli
Assistant
Department of Technological Metals, Machinery and Equipment, Mechanical Engineering Almalyk State Technical Institute
Republic of Uzbekistan, Almalyk
Erkinboyeva Maftuna Eldor qizi
student, Department of Technological Metals, Machinery and Equipment, Mechanical Engineering Almalyk State Technical Institute
Republic of Uzbekistan, Almalyk
Obobakirova Muhlisa Alisher qizi
student, Department of Technological Metals, Machinery and Equipment, Mechanical Engineering Almalyk State Technical Institute
Republic of Uzbekistan, Almalyk
O'rolova Surayyo Ilhom qizi
student, Department of Technological Metals, Machinery and Equipment, Mechanical Engineering Almalyk State Technical Institute
Republic of Uzbekistan, Almalyk
Maxmadiyorov Sayfillajon Asliddin
student, Department of Technological Metals, Machinery and Equipment, Mechanical Engineering Almalyk State Technical Institute
Republic of Uzbekistan, Almalyk

Аннотация

Цель исследования — установить влияние содержания графита в керамических флюсах на основе шеелитового концентрата на восстановление вольфрама, устойчивость электрошлакового переплава и свойства полученного металла, а также определить рациональную долю восстановителя. В статье представлены результаты экспериментального исследования пяти составов флюсов с содержанием графита от 2 до 20 % при постоянной массовой доле флюорита (CaF_2), составляющей 20 %. Рассмотрены изменения химического состава и твёрдости металла, а также особенности протекания электрошлакового процесса в зависимости от количества вводимого восстановителя. Установлено, что увеличение содержания графита способствует интенсификации восстановления соединений вольфрама и повышению его перехода из флюса в металлический расплав. При введении 5 % графита содержание вольфрама в металле составляет 1,2–1,4 %, тогда как при увеличении доли восстановителя до 17–20 % достигает 6,2–8,0 %. Выявлено, что при содержании графита 15–20 % концентрация углерода стабилизируется в диапазоне 0,32–0,35 %, а твёрдость металла достигает 450–470 HB. Одновременно чрезмерное увеличение количества графита повышает электропроводность шлаковой ванны и снижает устойчивость электрошлакового процесса. На основании полученных результатов рациональное содержание графита определено в пределах 15–17 %, обеспечивающих сочетание восстановления вольфрама, повышения твёрдости и приемлемой устойчивости переплава. Полученные экспериментальные данные

могут использоваться при выборе состава керамических флюсов на основе шеелитового концентрата и обосновании содержания углеродного восстановителя для получения металла с заданными характеристиками и свойствами.

Abstract

The aim of this study is to determine how graphite content in scheelite concentrate-based ceramic fluxes affects tungsten reduction, electroslag remelting stability, and the properties of the resulting metal, and to identify an appropriate reducing agent content. Five experimental flux compositions containing 2–20 wt.% graphite were investigated at a constant fluorite (CaF_2) content of 20 wt.%. Changes in metal chemical composition and hardness, together with electroslag process behaviour, were evaluated as a function of graphite addition. Increasing graphite content intensified the reduction of tungsten compounds and promoted tungsten transfer from the flux into the molten metal. At 5 wt.% graphite, the tungsten content in the metal was 1.2–1.4 wt.%, increasing to 6.2–8.0 wt.% at graphite contents of 17–20 wt.%. At 15–20 wt.% graphite, the carbon content stabilised within 0.32–0.35 wt.%, while metal hardness reached 450–470 HB. However, excessive graphite increased the electrical conductivity of the slag bath and reduced process stability. Based on these findings, a graphite content of 15–17 wt.% was identified as the preferred range, combining tungsten reduction, increased hardness, and acceptable remelting stability. These results provide an experimental basis for selecting scheelite concentrate-based ceramic flux compositions and adjusting carbon reducing agent additions to obtain metal with specified properties.

Ключевые слова: керамический флюс, флюорит, шеелитовый концентрат, вольфрам, микроструктура, твёрдость.

Keywords: ceramic flux, fluorite, scheelite concentrate, tungsten, microstructure, hardness.

Введение

В настоящее время восстановление деталей, применяемых в машиностроении, металлургии и горнодобывающей промышленности, а также повышение их износостойкости являются актуальными задачами. В связи с этим разработка керамических легирующих флюсов на основе местного минерального сырья имеет важное научно-практическое значение [1].

Шеелитовый концентрат как источник вольфрама позволяет улучшать механические свойства наплавленного металла. Однако эффективность перехода вольфрама в металл зависит от содержания восстановительных компонентов в составе флюса, в частности графита [2]. Графит интенсифицирует восстановление соединений вольфрама, однако его избыточное содержание может повышать электропроводность шлаковой ванны и снижать устойчивость процесса электрошлакового переплава [3].

Цель исследования — установить влияние содержания графита в керамических флюсах на основе шеелитового концентрата на переход вольфрама в металл, устойчивость процесса электрошлакового переплава и твёрдость наплавленного металла, а также обосновать оптимальное содержание графита.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования являлся процесс электрошлакового переплава с применением керамических легирующих флюсов на основе шеелитового концентрата. Основное внимание уделяли влиянию содержания графита на восстановление вольфрамсодержащих соединений, переход вольфрама в металлический расплав, изменение химического состава и твёрдости полученного металла, а также технологическую устойчивость электрошлакового процесса [4].

Вольфрам отличается высокой температурой плавления, твёрдостью и способностью к образованию карбидов. Его введение в состав стали влияет на процессы структурообразования и механические свойства металла. Однако переход вольфрама из шеелитового концентрата в металл зависит от ряда металлургических факторов, включая состав шлака, количество восстановителя и условия электрошлакового переплава [5].

В настоящем исследовании в качестве основного сырья использовали шеелитовый концентрат, шлакообразующего компонента — флюорит (CaF_2), восстановителя — графит. Для оценки влияния содержания графита разработали пять экспериментальных составов флюсов. Во всех вариантах массовую долю флюорита поддерживали на уровне 20 %, а содержание графита увеличивали от 2 до 20 %. По мере увеличения доли графита содержание шеелитового концентрата соответственно уменьшали. В таблице 1 приведены шихтовые составы экспериментальных керамических флюсов.

Таблица 1. Шихтовый состав экспериментальных керамических флюсов

Марка флюса	**Флюорит (CaF_2), %**	**Шеелитовый концентрат, %**	**Графит, %**
МС1	20	78	2
МС2	20	75	5
МС3	20	70	10
МС4	20	65	15
МС5	20	60	20

При выборе экспериментальных составов основным критерием являлось установление взаимосвязи между восстановительной способностью графита и устойчивостью процесса электрошлакового переплава. Постоянное содержание флюорита во всех составах позволило исключить влияние изменения его массовой доли. Однако поскольку увеличение содержания графита сопровождалось уменьшением доли шеелитового концентрата, полученные результаты отражают совместное изменение соотношения этих двух компонентов в шихте флюса [6].

Подготовка шихтовых материалов включала измельчение, дозирование, смешивание и термическую обработку. Для измельчения и перемешивания порошкообразных компонентов применяли планетарную шаровую мельницу. Сушку и прокаливание флюсов выполняли в муфельной электрической печи СНОЛ 8,2/1100. Согласно использованной экспериментальной методике, температурный интервал обработки материалов составлял 300–400 °C [7].

Электрошлаковый переплав проводили на экспериментальной установке с использованием источников питания ТДФ-1001, ВД-401 и аппарата MZ-1250 с IGBT-технологией. Для разработки режима электрошлакового переплава экспериментальных образцов принимали диаметр расходуемого электрода 4 мм, силу сварочного тока 600 А, напряжение 35 В и скорость подачи электрода 30 м/ч (0,5 м/мин). Расчётная электрическая мощность составляла 21 кВт. Формирование образцов предусматривали в медном водоохлаждаемом кристаллизаторе с размерами рабочей полости 40 × 40 × 100 мм. Для обеспечения сопоставимости результатов одинаковые технологические параметры принимали для всех пяти составов керамических флюсов МС1–МС5.

Для формирования образцов металла применяли медный водоохлаждаемый разъёмный кристаллизатор с размерами рабочей полости 40 × 40 × 100 мм. Использование водоохлаждаемого кристаллизатора обеспечивало направленный отвод теплоты от расплава и формирование металлических образцов для последующего исследования.

В качестве электродных материалов в общей методике исследования керамических флюсов применялись сварочные проволоки марок Св-08, Св-08А, Св-08ГС и Св-08Г2С. Для получения сопоставимых результатов в серии МС1–МС5 необходимо учитывать фактически использованную марку электрода, поскольку содержание углерода и легирующих элементов в исходном металле влияет на химический состав конечного сплава. Металлографические исследования выполняли с применением оптического микроскопа MX-4XC PLUS. Данное оборудование использовали для изучения структуры металла, выявления нарушений сплошности, пористости, неметаллических включений и других структурных особенностей. При этом идентификация конкретных карбидных фаз требует дополнительных методов фазового анализа.

Твёрдость металла определяли методом Бринелля. В экспериментальной базе использовался твердомер ТШ-2М, предусматривающий вдавливание шариков диаметром 5 или 10 мм с выдержкой под нагрузкой 10–15 с. Диаметр полученных отпечатков измеряли с помощью микроскопа МПБ-2. Дополнительно для исследования распределения твёрдости применялся универсальный твердомер HBRV-187.5. Выбор конкретной нагрузки и индентора для серии МС1–МС5 должен соответствовать протоколам испытаний.

Для оценки влияния графита на эффективность восстановления вольфрама анализировали содержание вольфрама в полученном металле. При этом сопоставляли изменения степени перехода вольфрама из шлаковой фазы в металл при увеличении доли графита. Согласно результатам исследования, при содержании графита во флюсе 5 % концентрация вольфрама в металле составляла 1,2–1,4 %. При увеличении количества восстановительного компонента до 17–20 % концентрация вольфрама возрастала до 6,2–8,0 %.

При оценке химического состава наплавленного металла также изучали изменение содержания углерода. Увеличение доли графита в составе флюса может влиять на количество углерода, переходящего в металл. По результатам экспериментов установлено, что при содержании графита 15–20 % концентрация углерода в металле стабилизировалась в диапазоне 0,32–0,35 %.

Основным показателем для оценки механических свойств металла была принята твёрдость по Бринеллю (НВ). Результаты экспериментов показали, что при использовании флюсов с содержанием графита 15–20 % твёрдость металла достигала 450–470 НВ. Полученные данные позволили проанализировать взаимосвязь между содержанием графита, переходом вольфрама в металл и твёрдостью полученного металла [8].

Одним из важных этапов исследования являлось определение предельного содержания восстановительного компонента. Для этого сопоставляли положительное влияние графита на эффективность восстановления вольфрама с технологическими ограничениями, возникающими при его избыточном количестве. В материалах исследования отмечено, что при содержании графита свыше 20 % на поверхности шлаковой ванны образуются пористые и спёкшиеся продукты, повышается электропроводность и возникает риск перехода электрошлакового режима в дуговой [9;10].

Для оценки воспроизводимости экспериментальных результатов проводили по пять независимых электрошлаковых переплавов для каждого из пяти составов керамического флюса (МС1–МС5). На каждом полученном образце выполняли пять измерений твёрдости по методу Бринелля на различных участках исследуемой поверхности. Таким образом, общее количество переплавов составляло 25, а количество измерений твёрдости — 125. Статистическую обработку результатов проводили путём определения среднего арифметического значения и стандартного отклонения.

Результаты и обсуждение

Для определения влияния содержания графита в керамических флюсах на основе шеелитового концентрата на процесс электрошлакового переплава и свойства наплавленного металла исследованы пять экспериментальных составов флюсов (МС1–МС5). В ходе экспериментов содержание графита изменяли от 2 до 20 %, поддерживая долю флюорита (CaF_2) на уровне 20 %.

Влияние содержания графита на переход вольфрама в металл. Экспериментальные исследования показали, что увеличение содержания графита интенсифицирует восстановление соединений вольфрама и способствует его переходу в металл. При содержании графита во флюсе 5 % концентрация вольфрама в наплавленном металле составляла 1,2–1,4 %. При увеличении доли графита до 17–20 % концентрация вольфрама достигала 6,2–8,0 %.

Полученные результаты свидетельствуют о важной роли графита как восстановительного компонента. С увеличением его содержания переход вольфрама в металлическую фазу усиливается. Однако поскольку повышение доли графита сопровождалось уменьшением содержания шеелитового концентрата, наблюдаемые результаты получены в условиях совместного изменения соотношения компонентов флюса.

Влияние графита на содержание углерода в металле. В ходе исследования установлена взаимосвязь между содержанием графита во флюсе и концентрацией углерода в наплавленном металле. Увеличение доли графита приводило к изменению содержания углерода в металле.

При содержании графита 15–20 % концентрация углерода в металле стабилизировалась в диапазоне 0,32–0,35 %. Этот результат показывает, что в указанном диапазоне дальнейшее увеличение содержания графита не приводит к существенному повышению концентрации углерода в металле.

В исследовании отмечено влияние присутствия вольфрама на распределение углерода в металле и процессы образования соединений.

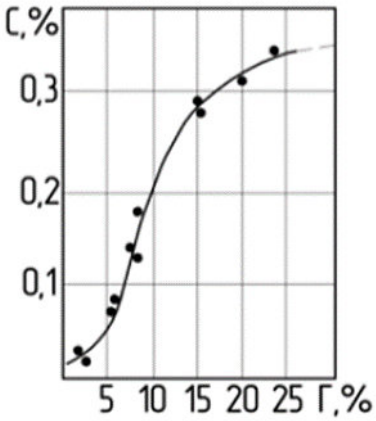


Рисунок 1. Влияние содержания графита во флюсе на концентрацию углерода в наплавленном металле

Экспериментальные результаты подтвердили, что изменение содержания графита влияет на твёрдость наплавленного металла. С увеличением количества графита усиливался переход вольфрама в металл и наблюдалось повышение твёрдости.

При содержании графита во флюсе 15–20 % твёрдость наплавленного металла достигала 450–470 НВ. Этот результат может быть связан с совместным влиянием вольфрама и углерода на свойства металла.

Образование твёрдых соединений в результате взаимодействия вольфрама с углеродом может способствовать упрочнению металла. Однако для подтверждения конкретного типа и количества этих соединений необходимы дополнительные фазовые и металлографические исследования.

Результаты исследования показали, что содержание графита влияет не только на химический состав и твёрдость металла, но и на технологические свойства шлаковой ванны.

При использовании составов с содержанием графита до 20 % сохранялась подвижность шлаковой ванны и наблюдалось относительно равномерное распределение шлака по поверхности наплавленного металла.

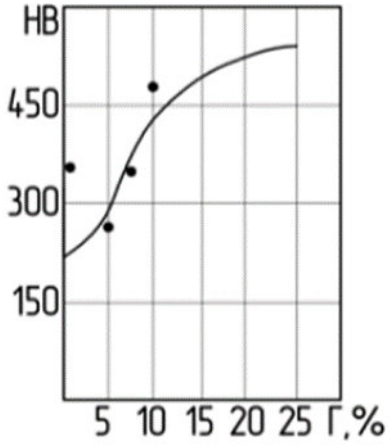


Рисунок 2. Зависимость твёрдости сплава (HB) от содержания графита (Г) во флюсе

Для оценки влияния содержания графита в составе керамического флюса на твёрдость наплавленного металла рассмотрены пять составов МС1–МС5, содержащих соответственно 2, 5, 10, 15 и 20 % графита. На основе выявленной тенденции повышения твёрдости с увеличением содержания графита выполнена расчётная оценка исследуемого показателя.

В расчётной серии средние значения твёрдости для составов МС1, МС2, МС3, МС4 и МС5 составили соответственно 245, 285, 355, 452 и 465 НВ. Принятые для оценки разброса стандартные отклонения составили 8, 9, 11, 12 и 13 НВ, а соответствующие коэффициенты вариации — 3,27; 3,16; 3,10; 2,65 и 2,80 %.

Анализ полученной зависимости показывает повышение расчётной твёрдости наплавленного металла с увеличением содержания графита в составе керамического флюса. При увеличении доли графита с 15 до 20 % прирост твёрдости составляет 13 НВ, или приблизительно 2,9 %. Снижение относительного прироста твёрдости позволяет предположить, что дальнейшее увеличение содержания графита может оказаться менее эффективным.

При содержании графита 15–20 % концентрация углерода в металле стабилизировалась в диапазоне 0,32–0,35 %, а твёрдость достигала 450–470 НВ.

По результатам исследования содержание графита около 15–17 % оценено как наиболее рациональный диапазон для керамических флюсов на основе шеелитового концентрата. Такое содержание обеспечивает благоприятное сочетание перехода вольфрама в металл, твёрдости металла и технологической устойчивости электрошлакового процесса.

Таким образом, экспериментальные исследования показали, что регулирование доли графита в составе керамического флюса позволяет увеличивать переход вольфрама в металл и повышать твёрдость наплавленного металла. Полученные результаты имеют научно-практическое значение для разработки новых керамических легирующих флюсов на основе местного минерального сырья.

Заключение

Проведённые экспериментальные исследования показали, что увеличение содержания графита в керамических флюсах на основе шеелитового концентрата способствует интенсификации восстановления соединений вольфрама и его переходу в металл. При содержании графита 15–20 % концентрация углерода в наплавленном металле составляла 0,32–0,35 %, а твёрдость — 450–470 HB.

Установлено, что избыточное количество графита может отрицательно влиять на устойчивость процесса электрошлакового переплава. По результатам исследования содержание графита 15–17 % рекомендовано как наиболее рациональный диапазон. Полученные результаты имеют практическое значение для разработки высокоэффективных керамических легирующих флюсов на основе местного минерального сырья.

Список литературы

1. Мадалиев Самандар Дилшод Угли, Ташматов Равшан Кабулович, & Юсупов Бекзод Дилмурод Угли (2025). Влияние содержания флюорита на физико-химические и технологические свойства керамических флюсов для сварки и наплавки. Universum: технические науки, 3 (12 (141)), 50–52. doi: 10.32743/UniTech.2025.141.12.21484.
2. Макиенко В.М. Совершенствование процессов создания шлаковых систем и получение сварочных материалов с использованием минерального сырья Дальневосточного региона. Дис. На соиск. Учен. Степ. Доктора техн. Наук. – / В.М, 2011.
3. Рауфов Л., Бердиев Д., Умарова М., Ташматов Р., Садуллаев З., Фазилов Д. Влияние высокохромистых порошковых покрытий на износостойкость рабочих деталей // Международная конференция по инженерии надёжных систем (ICoRSE. – 2025. – Т. 1592. – С. 15–26. – DOI: 10.1007/978-3-032-02508-1_2.
4. Рауфов Л.М., Абралов М.А., Эргашев М., Абдукаххаров А.А. Абразивный износ поверхностей нагрева котельных агрегатов энергоблоков // “Materialshunoslik, materiallar olishning innovatsion texnologiyalari va payvandlash ishlab chiqarishning dolzarb muammolari” Respublika ilmiy-texnik anjumani. – 2022.
5. Рауфов Л.М., Эргашев М., Абдукаххоров А.А. Определение остаточных деформаций при электроконтактном припекании композиционных порошков // Universum: технические науки. – 2021. – № 12–1 (93).
6. Рауфов Л.М., Эргашев М., Садуллаев З.Ш., Абдукаххоров А.А. Об одном из способов исследования кинетики превращений при электроконтактном припекании // Universum: технические науки. – 2022. – № 4–2 (97).
7. Рауфов Л.М., Эргашев М., Садуллаев З.Ш. Исследование влияния охлаждающей жидкости на основе водного раствора полимера на свойства стали 110Г13Л // Universum: технические науки. – 2023. – № 4 (109).
8. Тураходжаев Н.Д. Исследование влияния температуры заливки на образование пригара в стальных отливках [Электронный ресурс]. // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. – 2026. URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/22252 (дата обращения: 30.03.2026).

9. Эргашев М., Садуллаев З.Ш., Рауфов Л.М. Износ рабочих лопаток дымососов и упрочняющие покрытия для повышения износостойкости // Universum: технические науки. – 2021. – № 1 (82).
10. Thommes M., Kaneko K., Neimark A.V., Olivier J.P., Rodriguez-Reinoso F., Rouquerol J., Sing K.S.W. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). Pure and Applied Chemistry. 2015. Vol. 87, No. 9–10. P. 1051–1069. DOI: 10.1515/pac-2014-1117.

References

1. Madaliev Samandar Dilshod Ugli, Tashmatov Ravshan Kabulovich, & Yusupov Bekzod Dilmurod Ugli (2025). [Effect of fluorite content on the physicochemical and technological properties of ceramic fluxes for welding and surfacing. Universum: Technical Sciences, 3 (12 (141)), 50–52. doi: 10.32743/UniTech.2025.141.12.21484] (In Russ.).
2. Makienko V.M. [Improvement of the processes of creating slag systems and production of welding materials using mineral raw materials of the Far Eastern region. Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences]. – / V.M, 2011 (In Russ.).
3. Raufov L., Berdiev D., Umarova M., Tashmatov R., Sadullayev Z., Fazilov D. The Influence of High-Chromium Powder Coatings on Wear Resistance of Working Parts // International Conference on Reliable Systems Engineering (ICoRSE. – 2025. – P. 15–26. – DOI: 10.1007/978-3-032-02508-1_2. (In Russ.).
4. Raufov L.M., Abralov M.A., Ergashev M., Abdukakharov A.A. Abrasive Wear of Heating Surfaces of Boiler Units in Power Generating Units // Proceedings of the Republican Scientific and Technical Conference “Current Issues of Materials Science, Innovative Technologies for Materials Production, and Welding Engineering”. – 2022. – P. 343–344. (In Russ.).
5. Raufov L.M., Ergashev M., Abdukakhkhorov A.A. Determination of Residual Deformations During Electroc ontact Sintering of Composite Powders // Universum: Technical Sciences. – 2021. – No. 12–1 (93). (In Russ.).
6. Raufov L.M., Ergashev M., Sadullayev Z.Sh., Abdukakhkhorov A.A. On One Method for Studying the Kinetics of Transformations During Electrical Contact Sintering // Universum: Technical Sciences. – 2022. – No. 4–2 (97). (In Russ.).
7. Raufov L.M., Ergashev M., Sadullayev Z.Sh. Investigation of the Effect of a Polymer-Based Aqueous Cooling Solution on the Properties of 110G13L Steel // Universum: Technical Sciences. – 2023. – No. 4 (109). (In Russ.).
8. Turakhodzhaev N.D. [Investigation of the effect of pouring temperature on burn-on formation in steel castings] [Электронный ресурс]. // Universum: tekhnicheskie nauki: elektron. nauchn. zhurn. – 2026. – URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/22252 (accessed: 11.11.2026). (In Russ.).
9. Ergashev M., Sadullayev Z.Sh., Raufov L.M. Wear of Smoke Exhauster Impeller Blades and Protective Coatings for Improving Wear Resistance // Universum: Technical Sciences. – 2021. – No. 1 (82). (In Russ.).

10. Thommes M., Kaneko K., Neimark A.V., Olivier J.P., Rodriguez-Reinoso F., Rouquerol J., Sing K.S.W. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). Pure and Applied Chemistry. 2015. Vol. 87, No. 9–10. P. 1051–1069. DOI: 10.1515/pac-2014-1117.

Статья поступила в редакцию: 25.10.2026
Статья принята к публикации: 31.10.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 538.945.9

DOI: 10.32743/UniTech.2026.152.11.23639

Фазовый состав и микроструктура керамики Bi(Pb)-Sr-Ca-Cu-O на основе прекурсора солнечного плавления

Эшонкулов Элёр Бахтиёрович
д-р философии (PhD) по техн. наукам, заведующий лабораторией Институт материаловедения Академии наук Республики Узбекистан
Республика Узбекистан, Ташкент
E-mail: elyoreshonkulov17@gmail.com

Абдурахманов Кахар Паттахович
д-р физ.-мат. наук, проф.
Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммада ал-Хорезми
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: prof.aqp@mail.ru

Коххаров Мирзохид Хусанбоевич
д-р хим. наук, доц.
Наманганский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: mirzo199008@mail.ru

Султанов Амирхан Усубжон угли
д-р философии (PhD) по хим.наукам, методист отдела учебно-методической работы Наманганский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Наманган
E-mail: amirxonsultonov34@gmail.com

Халилов Сарвар Самадович
д-р философии (PhD) по педагогическим наукам, старший преподаватель
Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммада ал-Хорезми
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: sarvarsamadovich@gmail.com

Библиографическое описание: Фазовый состав и микроструктура керамики Bi(Pb)-Sr-Ca-Cu-O на основе прекурсора солнечного плавления // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Эшонкулов Э.Б. [и др.]. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23639

Phase composition and microstructure of Bi(Pb)-Sr-Ca-Cu-O ceramics derived from a solar-melted precursor

Eshonkulov Elyor
doctor of Philosophy (PhD)
in Technical Sciences, Head of Laboratory Institute of Materials Science Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan
Uzbekistan, Tashkent
Abdurakhmanov Kakhar
doctor of Physical and Mathematical Sciences (DSc)
professor, Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khwarizmi
Uzbekistan, Tashkent
Kokhharov Mirzokhid
doctor of Chemical Sciences (DSc)
Associate Professor, Namangan State Technical University
Uzbekistan, Namangan
Sultanov Amirkhan
doctor of Philosophy (PhD)
in Chemical Sciences, Methodologist, Department of Academic and Methodological Affairs, Namangan State Technical University
Uzbekistan, Namangan
Khalilov Sarvar
doctor of Philosophy (PhD) in Pedagogical Sciences, Senior Lecturer
Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khwarizmi
Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

Исследованы фазовый состав и микроструктура прекурсора солнечного плавления и полученной из него керамики с номинальным начальным составом $Bi_{1,7}Pb_{0,3}Sr_2Ca_{14}Cu_{15}O_y$ (Bi/Pb-221415, n=15). Цель работы - выявить различия между этими технологическими состояниями. Прекурсор получали плавлением в концентрированном солнечном излучении приблизительно при 1250 °C в течение 3-5 мин с последующим быстрым охлаждением на постоянно охлаждаемом медном поддоне. Керамику готовили термической обработкой при 848 °C в течение 96 ч. Для сравнения использовали рентгеновскую дифракцию и сканирующую электронную микроскопию; исходную шихту до плавления дополнительно исследовали методом DSC/TG в воздухе при 20 °C/мин. Наиболее согласованный набор отражений прекурсора соответствует Cu_2O; отнесения к CaO и компоненту типа Bi-2201 предварительны. В керамике наблюдаются линии, согласующиеся с компонентами типов Bi-2212 и Bi-2223, включая низкоугловое отражение около 5,76°, поддерживающее отнесение к Bi-2212. На SEM-изображении прекурсора различимы вытянутые и пластинчатые элементы, а в поле керамики - плоские перекрывающиеся фрагменты со ступенчатыми гранями. HDSC исходной шихты имеет минимумы при 460,1; 778,3; 928,0 и 967,5 °C; за зарегистрированный участок нагрева масса уменьшилась приблизительно на 10,2 %. Сопоставление выявляет различия в наборах кристаллических компонентов и организации пластинчатых элементов прекурсора и керамики данного номинального состава без определения количественных фазовых долей.

Abstract

The phase composition and microstructure of a solar-melted precursor and derived ceramics with the nominal starting composition $Bi_{1.7}Pb_{0.3}Sr_2Ca_{14}Cu_{15}O_y$ (Bi/Pb-221415, n=15) were investigated. The aim was to identify differences between these processing states. The precursor was prepared by melting under concentrated solar radiation at approximately 1250 °C for 3-5 min, followed by rapid cooling on a continuously cooled copper plate. The ceramics were heat-treated at 848 °C for 96 h. X-ray diffraction and scanning electron microscopy were used for comparison; the starting mixture before melting was additionally examined by DSC/TG in air at 20 °C/min. The most consistent set of precursor reflections corresponds to Cu_2O; the CaO and Bi-2201-type assignments remain preliminary. The ceramic pattern contains reflections compatible with Bi-2212- and Bi-2223-type components, including a low-angle reflection near 5.76° that supports the Bi-2212 assignment. The precursor SEM image shows elongated and plate-like elements, whereas the ceramic field contains flat overlapping fragments with stepped faces. The starting mixture exhibits HDSC minima at 460,1; 778,3; 928,0 and 967,5 °C, with an overall mass decrease of approximately 10.2 % over the recorded heating interval. The comparison distinguishes the crystalline component assemblages and the arrangement of plate-like elements in the precursor and ceramics of this nominal composition, without determining quantitative phase fractions.

Ключевые слова: Bi(Pb)-Sr-Ca-Cu-O, солнечное плавление, прекурсор, керамика, рентгенофазовый анализ, микроструктура, термический анализ.

Keywords: Bi(Pb)-Sr-Ca-Cu-O, solar melting, precursor, ceramics, X-ray phase analysis, microstructure, thermal analysis.

Введение

Получение керамики Bi-Sr-Ca-Cu-O через закалённый расплав требует контроля состава прекурсора и продуктов последующей термической обработки. Исходное соотношение катионов определяет общую рецептуру, однако не задаёт единственный кристаллический компонент: для этой системы характерны сложные фазовые равновесия и области твёрдых растворов [7, с. 861-864]. В стеклокерамике BiSrCaCuO показана зависимость набора купратных и сопутствующих оксидных фаз от начального состава и условий обработки [8, с. 2449]. Поэтому фазовый анализ необходимо сочетать с изучением микроструктуры на отдельных стадиях получения материала.

Современные исследования Pb-содержащих купратов показывают влияние длительности измельчения [10, с. 2262], добавления Cu при подготовке прекурсорных порошков [1, с. 5-6] и кислородного режима [11, с. 2-3] на структуру и фазовый состав. Cao и соавторы также связали изменение содержания Cu с плотностью врастаний Bi-2212 и Bi-2234 в Bi-2223 [2, с. 10018]. Эти работы раскрывают чувствительность системы к составу и предыстории, но относятся к определённым рецептурам и технологическим маршрутам. Для исходной смеси с существенно более высоким номинальным содержанием Ca и Cu состав кристаллических компонентов требует отдельного установления.

Концентрированное солнечное излучение обеспечивает высокотемпературный нагрев, параметры которого зависят от оптической системы концентратора [5, с. 139-141]. Быстрое охлаждение расплава позволяет получить прекурсор для последующей керамической обработки. Для номинального состава Bi/Pb-221415 остаётся открытым вопрос о сочетании кристаллических компонентов и морфологических признаков после такого охлаждения и после длительной выдержки при 848 °C. Различить эти состояния можно по совокупности диагностических отражений и особенностям поверхности, а не по номинальной формуле или пластинчатой форме отдельных элементов.

Цель работы - установить и сопоставить фазовые и микроструктурные особенности прекурсора солнечного плавления и керамики, полученной при 848 °C в течение 96 ч, для номинального начального состава $Bi_{1,7}Pb_{0,3}Sr_2Ca_{14}Cu_{15}O_y$ (Bi/Pb-221415, n=15). При сопоставлении рассматривали наборы диагностических отражений и взаимное расположение вытянутых и пластинчатых элементов на SEM-изображениях. Дополнительно охарактеризовано термическое поведение исходной шихты до солнечного плавления.

Материалы и методы

Подготовка шихты и получение материалов

Номинальный начальный состав $Bi_{1,7}Pb_{0,3}Sr_2Ca_{14}Cu_{15}O_y$ (Bi/Pb-221415, n=15) задаёт соотношение катионов исходной шихты и не является измеренным составом конечного продукта или формулой единственной фазы. Использовали Bi_2O_3 и PbO квалификации «х. ч.», SrO, CaO и CuO квалификации «ч. д. а.».

Реагенты сушили в SNOL-8,2/1100 при 100 – 120 °C в течение 1 ч и взвешивали на DNK323B. Смешение на LOIP LS-110 проводили при 200 об/мин в течение 5 ч. Шихту формовали гидравлическим прессом MP40 с усилием 40 кН и выдерживали при 200-300 °C в течение 2 ч.

Прекурсор получали в Большой солнечной печи в Паркенте по технологии Solar Fast Alloys Quenching-T [4, с. 60–61]. Плавление на открытом воздухе проводили приблизительно при 1250 °C и плотности потока 200 – 400 Вт/см2 в течение 3 – 5 мин. Расплав быстро охлаждали, подавая его на специальный постоянно охлаждаемый медный поддон.

Прекурсор измельчали вручную в агатовой ступке агатовым пестиком до порошка с размером частиц менее 25 мкм. После формования проводили обработку в муфельной печи в атмосфере воздуха при нормальном атмосферном давлении, в тигле из Al_2O_3: нагрев до 848 °C со скоростью 5 °C/мин, выдержка 96 ч и охлаждение со скоростью 5 °C/мин.

Рентгеновская дифракция и электронная микроскопия

Дифрактограммы прекурсора и керамики зарегистрированы на EMPYREAN в геометрии θ-θ с Cu Kα-излучением ($K\alpha_1$ = 1,54060 Å; $K\alpha_2$ = 1,54443 Å) при 45 кВ и 40 мА. Съёмку проводили в непрерывном режиме с вращением образца в диапазоне 2θ = 5,009-99,987° с шагом 0,013°. В протоколах измерений указаны температура 25 °C и время счёта 8,67 с. Анализировали экспериментальные интенсивности с учётом интерполяции при

первичной обработке профилей. На рис. 1 показан исходный график в диапазоне 20-60° с вертикальным разведением кривых; анализ основан на всём измеренном диапазоне, включая отражения за пределами рисунка.

Микроструктуру прекурсора и керамики исследовали методом сканирующей электронной микроскопии на микроскопе LEO 1455VP (Carl Zeiss). Морфологические особенности сопоставляли качественно по форме и взаимному расположению элементов на представленных изображениях. Масштабные отрезки для прекурсора и керамики составляют 10 и 5 мкм соответственно.

Термический анализ исходной шихты

Исходную шихту до солнечного плавления исследовали методом DSC/TG на LINSEIS STA PT 1600 в воздухе при скорости нагрева 20 °C/мин. Сигнал HDSC выражали в мкВ, а массу нормировали на первую зарегистрированную массу m_0 = 39,41 мг: $W(T) = 100 \times m(T)/m_0$. Минимумы определяли по наименьшему значению сигнала в областях 430 – 490, 740 – 820, 900 – 950 и 940-985 °C без сглаживания и вычитания базовой линии. Изменения массы на выделенных интервалах рассчитывали по формуле $\Delta m_i\,(\%) = 100 \times [m\left(T^2\right) - m(T_1)]/m_0 = W(T_2) - W(T_1)$. Терминологию использовали согласно [6, с. 546]. Числовые расчёты выполняли непосредственно по экспериментальным данным; при оценке фазовых соответствий учитывали совокупность отражений, их перекрытие и качество эталонов по описанным выше критериям.

Результаты и обсуждение

Фазовый состав прекурсора и керамики

Дифрактограммы прекурсора и керамики различаются набором отражений и их относительными интенсивностями (рис. 1). Для прекурсора серия линий при 2θ=36,533; 42,452; 61,527 и 73,628° согласуется с Cu_2O по эталону 01-073-6371. Совпадение четырёх пространственно разделённых отражений делает Cu_2O наиболее надёжным фазовым соответствием для этого состояния.

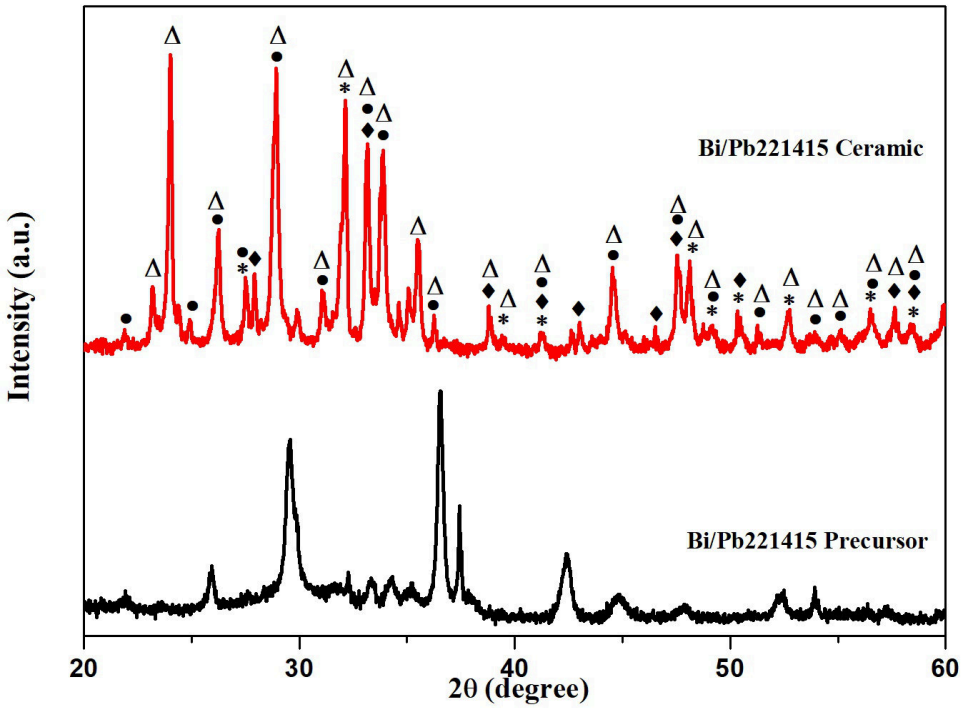


Рисунок 1. Дифрактограммы «Bi/Pb-221415 - прекурсор» и «Bi/Pb-221415 - керамика». Исходные обозначения: ● - компонент типа Bi-2212; Δ - типа Bi-2223; ♦ - Bi–Pb–Cu–O; * - (Sr,Ca)CuO_2

Линии прекурсора около 32,27; 37,44 и 53,90° допускают присутствие CaO (01-070-4068), а отражения около 7,29; 25,92 и 33,28° - компонента типа Bi-2201 (01-078-2019). Эти отнесения предварительны. Эталоны имеют отметки низкой точности и исключения из соответствующего набора; кроме того, для Bi-2201 не все сильные линии согласуются с экспериментом в выбранном окне сопоставления. Поэтому CaO и Bi-2201 нельзя считать установленными с той же уверенностью, что и Cu_2O.

В дифрактограмме керамики после обработки при 848 °C в течение 96 ч выделяется низкоугловое отражение 5,761°, совпадающее с линией 5,762° эталона типа Bi-2212 (01-078-2020). Дополнительные соответствия около 24,94 и 27,48° поддерживают присутствие компонента этого структурного типа. Линии около 26,24; 28,91; 32,08; 33,15 и 47,57° согласуются с эталоном типа Bi-2223 (01-078-5794), однако области 33,15 и 47,57° неоднозначны из-за перекрытия с отражениями других купратных кандидатов.

Низкоугловое отражение существенно для различения близких купратных компонентов. В работе [10, с. 2261] для Bi-2212 и Bi-2223 приведены характерные линии около 5,7 и 4,7° соответственно. Область первой линии охвачена настоящим измерением, тогда как вторая расположена ниже его начала. Поэтому линия 5,76° усиливает отнесение к Bi-2212, а вывод о компоненте типа Bi-2223 основан на менее специфичном наборе отражений. С учётом качества эталона Bi-2212 и перекрытия линий эти соответствия не определяют фазовые доли или преобладание одного компонента.

Отражения керамики около 27,99 и 46,50° допускают дополнительный Bi-Pb-Cu-O компонент, совместимый с эталоном 01-070-7205. Линии 35,25 и 44,77° прекурсора, а также 23,21 и 31,09° керамики остаются неотнесёнными в пределах использованного набора эталонов. Таким образом, фазовая картина керамики не исчерпывается однозначным отнесением всех линий к Bi-2212 и Bi-2223.

Сопоставление выявляет различие кристаллических наборов двух состояний Bi/Pb-221415: серия линий Cu_2O наиболее отчётливо характеризует прекурсор, тогда как для керамики существенны низкоугловое отражение 5,76° и совокупность линий купратных компонентов типов Bi-2212/Bi-2223. Такое различие согласуется с зависимостью фазового состава стеклокерамики BiSrCaCuO от исходной рецептуры и термической обработки [8, с. 2451–2452]. Однако по двум состояниям нельзя установить последовательность реакций или распределение исходных Ca и Cu между всеми компонентами. Влияние кислородного режима [11, с. 2-3] и межслоевые врастания [2, с. 10020], изученные для других рецептур, также не определяются настоящим сопоставлением XRD и SEM.

Микроструктура двух технологических состояний

В прекурсоре наблюдаются вытянутые и пластинчатые элементы с различной ориентацией, пересекающимися гранями и промежутками между ними (рис. 2a). В поле керамики видны плоские перекрывающиеся фрагменты, ступенчатые участки и протяжённые грани (рис. 2b). Общим морфологическим признаком остаётся пластинчатая форма; различия проявляются во взаимном расположении элементов и выраженности ступенчатых граней на выбранных участках поверхности.

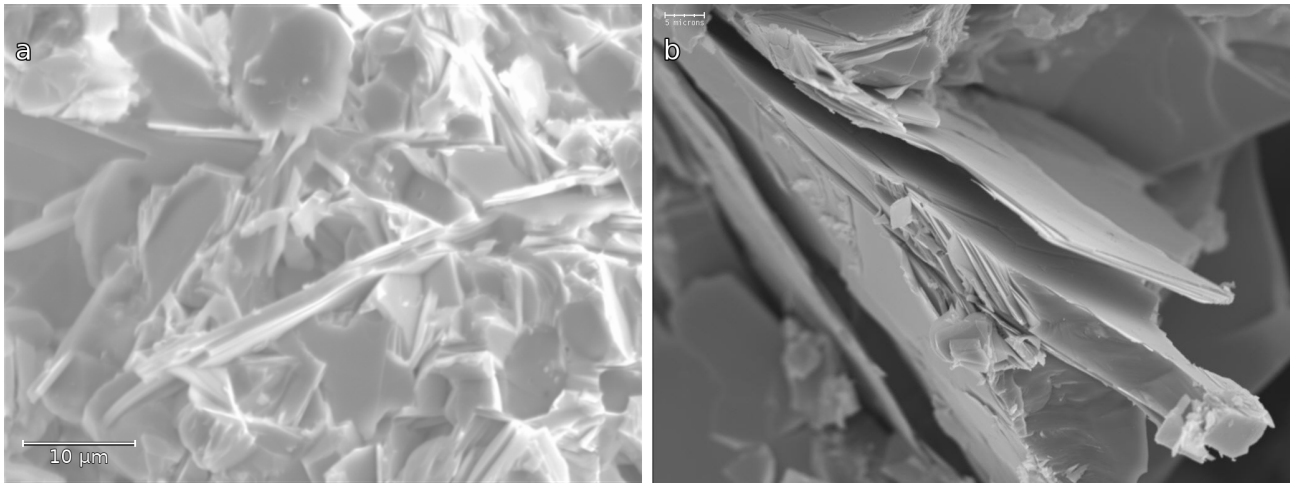


Рисунок 2. «Bi/Pb-221415 - прекурсор» (a) и «Bi/Pb-221415 - керамика» после 848 °C, 96 ч (b)

Пластинчатая форма согласуется со слоистым строением Bi-содержащих купратов, установленным монокристальной дифракцией для Bi-2212 [3, с. 46-47]. Сама морфология не позволяет различить Bi-2212 и Bi-2223, но дополняет XRD описанием организации поверхности: вытянутые пересекающиеся элементы прекурсора сопоставляются с перекрывающимися плоскими фрагментами керамики.

Дополнительная термическая характеристика исходной шихты

На кривой HDSC исходной шихты наблюдаются четыре локальных минимума при 460,1; 778,3; 928,0 и 967,5 °C (рис. 3). Высокотемпературный участок включает два различимых минимума около 928 и 967 °C перед резким повышением сигнала. Положения минимумов, значения сигнала и границы расчёта изменений массы приведены в табл. 1.

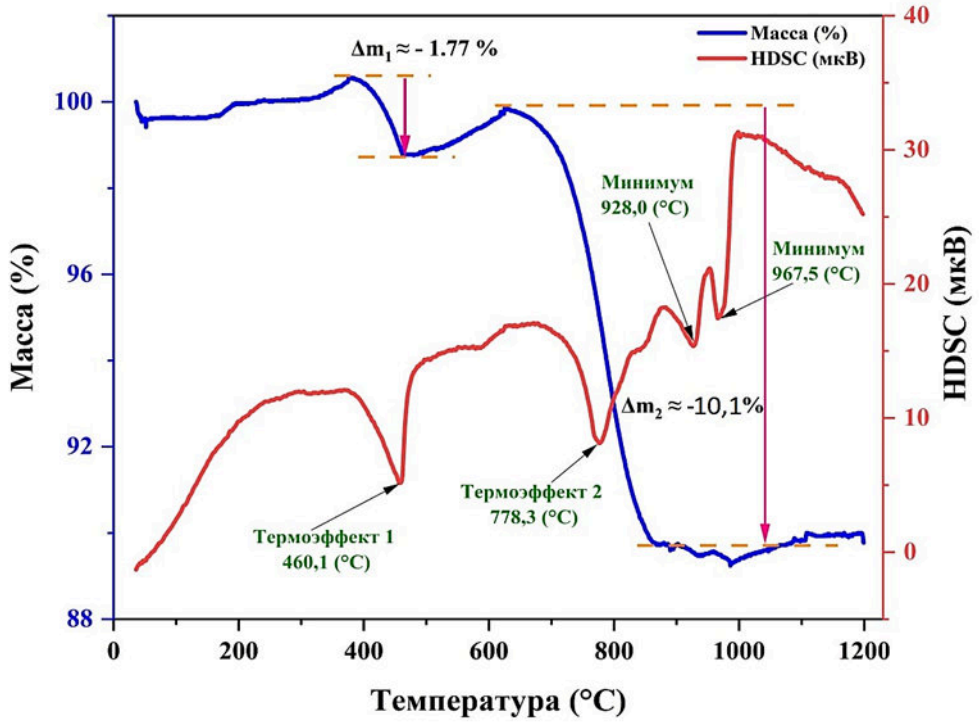


Рисунок 3. TG (синяя кривая) и HDSC (красная кривая) исходной шихты Bi/Pb-221415 до солнечного плавления: воздух, 20 °C/мин

На первом и втором выделенных интервалах масса уменьшается приблизительно на 1,77 и 10,10 % от m_0 соответственно. За весь зарегистрированный участок нагрева масса изменяется с 39,41 до 35,38 мг, что соответствует общему уменьшению приблизительно на 10,2 % (табл. 1).

Таблица 1. Результаты DSC/TG исходной шихты Bi/Pb-221415

Показатель	T, °C	t, мин	HDSC / TG
Минимум 1	460,1	20,45	5,15 мкВ
Минимум 2	778,3	36,83	8,13 мкВ
Минимум 3	928,0	44,44	15,36 мкВ
Минимум 4	967.5	46,42	17,43 мкВ
Интервал 1	375,81-463,81	16,31-20,66	Δm_1 = -1,77 %
Интервал 2	624,81-870,81	29,03-41,54	Δm_2 = -10,1 %
Весь нагрев	35,81-1198,81	0-58,14	Δm = -10,23 %

Примечание. Для минимумов указан сигнал HDSC, для интервалов — начальная и конечная массы и их изменение относительно m_0.

Термический анализ характеризует исходную смесь реагентов, тогда как XRD и SEM относятся к прекурсору и керамике после последующих стадий обработки. В исследованиях BSCCO с использованием DSC показана зависимость термического поведения от состава и способа подготовки прекурсоров [9, с. 160-161]. Поэтому наблюдаемые минимумы служат характеристиками данной шихты и не устанавливают температуры образования конкретных фаз в прекурсоре или керамике. Для такого отнесения потребовалось бы проследить фазовые изменения непосредственно в соответствующих температурных областях.

Заключение

Для номинального начального состава $Bi_{1,7}Pb_{0,3}Sr_2Ca_{14}Cu_{15}O_y$ (Bi/Pb-221415, n=15) прекурсор солнечного плавления и керамика после обработки при 848 °C в течение 96 ч различаются наборами дифракционных отражений. В прекурсоре наиболее надёжно согласуется серия линий Cu_2O; отнесения к CaO и компоненту типа Bi-2201 остаются предварительными. В керамике наблюдаются линии, совместимые с компонентами типов Bi-2212 и Bi-2223; отражение 5,76° дополнительно поддерживает отнесение к Bi-2212.

На SEM-изображениях обоих состояний сохраняются пластинчатые элементы. Прекурсор характеризуется вытянутыми пересекающимися фрагментами, а исследованное поле керамики - плоскими перекрывающимися участками со ступенчатыми гранями. В совокупности с различием дифракционных наборов эти наблюдения характеризуют фазовые и морфологические особенности материала до и после длительной керамической обработки.

Дополнительное исследование исходной шихты в воздухе при 20 °C/мин выявляет минимумы HDSC при 460,1; 778,3; 928,0 и 967,5 °C и общее уменьшение массы приблизительно на 10,2 % за зарегистрированный участок нагрева. Таким образом, термическая запись характеризует начальную смесь, а сопоставление XRD и SEM устанавливает различия кристаллических наборов и организации поверхности двух состояний Bi/Pb-221415.

Список литературы

1. Cao H., Zhang S., Chang J. [et al.] Improving phase transformation and superconducting performance of Bi-2223 tapes via Cu addition // Journal of Materials Science: Materials in Electronics. – 2024. – T. 35. – Art. 1478. – DOI: 10.1007/s10854-024-13232-w.
2. Cao H., Zhang S., Cui Y. [et al.] Flux pinning mechanism of Bi-2223 bulk superconductors by tuning Bi-2212 and Bi-2234 intergrowths // Ceramics International. – 2025. – T. 51, № 8. – P. 10014–10025. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2024.12.433.
3. Gladyshevskii R.E., Flükiger R. Modulated structure of $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+}\delta$, a high-Tc superconductor with monoclinic symmetry // Acta Crystallographica Section B: Structural Science. – 1996. – T. 52, № 1. – P. 38–53. – DOI: 10.1107/S0108768195007075.
4. Gulamova D.D., Jalilov D., Eshonkulov E. [et al.] Nanostructured Low-Resistance Ceramics Based on the Bi–Pb–Sr–Ca–Cu–O System Produced by Solar Technology // Refractories and Industrial Ceramics. – 2022. – T. 63, № 1. – P. 60–65. – DOI: 10.1007/s11148-022-00681-1.

5. Levêque G., Bader R. Lipiński W., Haussener S. High-flux optical systems for solar thermochemistry // Solar Energy. – 2017. – T. 156. – P. 133–148. – DOI: 10.1016/j.solener. 2017.07.046.
6. Lever T., Haines P., Rouquerol J., Charsley E.L., Van Eckeren P., Burlett D.J. ICTAC nomenclature of thermal analysis (IUPAC Recommendations 2014) // Pure and Applied Chemistry. – 2014. – T. 86, № 4. – P. 545–553. – DOI: 10.1515/pac-2012-0609.
7. Majewski P. Materials Aspects of the High-temperature Superconductors in the System Bi_2O_3–SrO–CaO–CuO // Journal of Materials Research. – 2000. – T. 15, № 4. – P. 854–870. – DOI: 10.1557/JMR.2000.0123.
8. Massalker Y., Sembira A.N., Baram J. Processing characteristics and properties of BiSrCaCuO superconducting glass ceramics prepared by melt-quenching // Journal of Materials Research. – 1993. – T. 8, № 10. – P. 2445–2457. – DOI: 10.1557/JMR.1993.2445.
9. Mayoral M.C., Andrés J.M., Bona M.T., Angurel L.A., Natividad E. Approximation to the laser floating zone preparation of high temperature BSCCO superconductors by DSC // Thermochimica Acta. – 2004. – T. 409, № 2. – P. 157–164. – DOI: 10.1016/ S0040-6031(03)00354-X.
10. Saritekin N.K. Üzümcü A.T. Improving Superconductivity, Microstructure, and Mechanical Properties by Substituting Different Ionic Pb Elements to Bi and Ca Elements in Bi-2223 Superconductors // Journal of Superconductivity and Novel Magnetism. – 2022. – T. 35. – P. 2259–2273. – DOI: 10.1007/s10948-022-06209-5.
11. Zhang W., Zhang S., Cao H. [et al.] Influences of oxygen partial pressure on the phase composition of the (Bi, Pb)-2212 precursor powder // Physica C: Superconductivity and its Applications. – 2024. – T. 618. – Art. 1354448. – DOI: 10.1016/j.physc.2024.1354448.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И РОБОТОТЕХНИКА

Статья поступила в редакцию: 11.11.2026
Статья принята к публикации: 20.11.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 532.542

DOI: 10.32743/UniTech.2026.152.11.23777

Влияние профиля сужающегося канала на амплитуду и фазу пульсаций давления

Бабаджанов Юлдаш Тиловович
канд. физ.-мат. наук, доц.
Каршинский государственный университет
Республика Узбекистан, г. Карши
ORCID: 0009-0001-1674-7163
E-mail: l: babajanov.y@mail.ru ·

Бабаджанова Ирода Юлдашевна
д-р филос. по техн. наукам (PhD)
Институт военной авиации
Университета военной безопасности и обороны Республики Узбекистан
Республика Узбекистан, г. Карши
ORCID 0000-0003-0466-5352
E-mail: l: babadjanova.i@mail.ru ·

Effect of converging channel profile on the amplitude and phase of pressure oscillations

Babajanov Yuldash Tilovovich
candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Karshi State University
Uzbekistan, Karshi

Babajanova Iroda Yuldashevna
PhD
in Engineering Institute of Military Aviation of the University of Military Security and Defense of the Republic of Uzbekistan
Uzbekistan, Karshi

Аннотация

Цель работы — установить, как продольное изменение площади сечения влияет на амплитуду и фазу давления при гармоническом расходе в полностью заполненном жёстком канале. В одномерной модели несжимаемой жидкости при постоянном давлении на выходе

Библиографическое описание: Бабаджанов Ю.Т., Бабаджанова И.Ю. Влияние профиля сужающегося канала на амплитуду и фазу пульсаций давления // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23777

конвективный и инерционный вклады в перепад давления получены интегрированием уравнения Эйлера. Сопоставлены профили с линейным изменением площади и обратной площади при одинаковых длине и концевых сечениях. Установлено, что при заданной ненулевой частоте опережение фазы давления относительно расхода одинаково во всех внутренних сечениях тогда и только тогда, когда обратная площадь меняется линейно. Получены частота пересечения амплитудных характеристик и критерий применимости квазистационарного расчёта при заданном допуске по амплитуде. При отношении входной площади к выходной 2 и в середине канала пересечение соответствует угловому числу Струхаля 2,084, а пределы для пятипроцентного допуска составляют 0,450 и 0,329 соответственно. Формулы проверены независимым численным интегрированием и разложением рассчитанного сигнала давления по гармоникам. Зависимости позволяют выбирать профиль по требованию к фазе и определять диапазон частот, в котором допустимо пренебречь локальным ускорением жидкости.

Abstract

This study examines how the longitudinal variation in cross-sectional area affects pressure amplitude and phase under harmonic discharge in a fully filled rigid channel. For one-dimensional incompressible flow with fixed outlet pressure, the convective and inertial contributions to the pressure difference are obtained by integrating the Euler equation. Two profiles with the same length and end areas are compared. One has a linear area distribution, and the other has a linear reciprocal-area distribution. At a prescribed nonzero frequency, the pressure phase lead relative to discharge is uniform across interior sections if and only if the reciprocal area varies linearly. The amplitude crossover frequency and a criterion for the applicability of the quasi-steady calculation at a specified amplitude tolerance are derived. At the midpoint of a channel with an inlet-to-outlet area ratio of 2, the angular Strouhal number at crossover is 2.084, and the limits for a five-percent tolerance are 0.450 and 0.329, respectively. The formulas are checked by independent numerical integration and harmonic decomposition of the computed pressure signal. The results provide a basis for selecting a profile to meet a phase requirement and identifying the frequency range in which local fluid acceleration can be neglected.

Ключевые слова: Сужающийся канал, пульсирующий расход, перепад давления, фазовый сдвиг, число Струхаля, квазистационарное приближение.

Keywords: Converging channel, pulsating discharge, pressure difference, phase shift, Strouhal number, quasi-steady approximation.

Введение

При переходе от широкого сечения к узкому скорость жидкости возрастает. В стационарном невязком потоке соответствующая разность давлений определяется концевыми сечениями и расходом. При пульсирующем расходе давление также требуется для ускорения массы жидкости, распределённой вдоль канала. Поэтому два участка с одинаковыми концевыми сечениями могут по-разному реагировать на одинаковое возмущение расхода. При проектировании открытых переходных участков отдельно

учитывают условия критического течения и возможное подпирание потока [5]. В полностью заполненных каналах постановка задачи зависит от заданных граничных условий для расхода и давления.

Решения задач о нестационарных струях со свободной границей рассматриваются в теории струй идеальной жидкости [2]. Для канала переменного сечения опубликовано двумерное решение на основе комплексного потенциала и метода малых возмущений, в котором проанализирована зависимость амплитуды и фазы давления от частоты [1]. В настоящей работе рассматривается полностью заполненный плавно сужающийся участок с жёсткими стенками и постоянным давлением на выходе. Эти условия позволяют выделить влияние распределения площади сечения на инерционную часть перепада давления и сравнить продольные профили при одинаковых концевых площадях.

Влияние геометрии на перепад давления изучалось в опытах с локальными сужениями [8]. В модели нестационарного течения к геометрическим составляющим был добавлен инерционный член [11]. Современные модели пониженного порядка учитывают форму сужения и вязкость при расчёте перепада давления [6, 10]. Для плавного сужения с фиксированным выходным давлением цель настоящей работы состоит в том, чтобы определить условие пространственного постоянства фазы, найти частоту равенства амплитуд для двух профилей и установить область допустимости квазистационарного приближения.

Материалы и методы

Уравнение движения и граничные условия

Рассматривается горизонтальный канал длиной L с жёсткими стенками. Координата x направлена от входа к выходу. Площадь сечения $A(x)$ положительна и плавно убывает от $A(0)$ до $A_e = A(L)$. Жидкость имеет постоянную плотность ρ. Предполагается одномерный невязкий поток с практически равномерной осевой скоростью в каждом сечении. Давление на выходе p_e задано постоянным. В установившемся периодическом режиме расход $Q(t)$ задаётся на входе.

Из уравнения неразрывности расход одинаков во всех сечениях. Средняя скорость при заданном гармоническом расходе выражается формулой

$$v(x,t) = \frac{Q(t)}{A(x)}, \qquad Q(t) = Q_0\,(1 + \varepsilon \cos \Omega t)\,. \tag{1}$$

Здесь $Q_0 > 0$ — средний расход, ε — относительная амплитуда, $0 < \varepsilon < 1$, $\Omega = 2\pi f$ — угловая частота в рад/с, f — частота в герцах. Амплитуда расхода равна εQ_0. Условие $\varepsilon < 1$ обеспечивает положительный расход в течение всего периода.

Для горизонтального участка уравнение Эйлера вдоль оси имеет вид $\partial_t v + v\partial_x v = -\partial_x p/\rho$. Интегрирование от x до L при $p(L,t) = p_e$ даёт выражение нестационарного Бернулли для заданного распределения скорости [3]

$$p(x,t) - p_e = \rho \frac{dQ}{dt} \int_x^L \frac{d\xi}{A(\xi)} + \frac{\rho Q^2}{2}\left(\frac{1}{A_e^2} - \frac{1}{A(x)^2}\right). \tag{2}$$

Первый член пропорционален производной расхода и интегралу от обратной площади между расчётным сечением и выходом. Аналогичную роль в гидравлических моделях пониженного порядка играет инерция столба жидкости [4]. Второй член обусловлен изменением кинетической энергии вдоль канала и описывает обратимую конвективную составляющую перепада давления.

Безразмерная форма и профили канала

Введены координата $s = x/L$, выходная скорость при среднем расходе $U_e = Q_0/A_e$, угловое число Струхаля $\omega = \Omega L/U_e$ и фазовая переменная $\theta = \Omega t$. Число Струхаля, определённое через циклическую частоту, равно $\omega/(2\pi)$. Для описания геометрии используются следующие функции

$$g(s) = \frac{A_e}{A(Ls)}, \qquad B(s) = 1 - g(s)^2, \qquad J(s) = \int_s^1 g(\sigma)\, d\sigma. \tag{3}$$

Безразмерное давление $P = (p - p_e)/\left(\rho U_e^2\right)$ после подстановки (1) в (2) записывается в форме

$$P(s,t) = \frac{B}{2}(1 + \varepsilon\cos\theta)^2 - \varepsilon\omega J \sin\theta. \tag{4}$$

Первая гармоника давления равна $\varepsilon Re\left(He^{i\theta}\right)$, где i — мнимая единица. Комплексный коэффициент H, его модуль M и фазовое опережение φ для $s < 1$ равны

$$H = B + i\omega J, \qquad M = \sqrt{B^2 + \omega^2 J^2}, \qquad \varphi = arctan\frac{\omega J}{B}. \tag{5}$$

Амплитуда первой гармоники в паскалях составляет $\rho U_e^2 \varepsilon M$. При положительной фазе максимум первой гармоники давления опережает максимум расхода. На выходе $B(1) = J(1) = 0$. Фаза в этой точке не определена вследствие нулевой амплитуды.

Для сравнения выбрано одинаковое отношение входной площади к выходной $R = A(0)/A_e > 1$. В профиле 1 линейно убывает площадь. Для этого профиля обратная площадь и её интеграл имеют вид

$$g_1(s) = \frac{1}{R - (R-1)s}, \qquad J_1(s) = \frac{\ln[R - (R-1)s]}{R-1}. \tag{6}$$

В профиле 2 линейно возрастает обратная площадь. Тогда

$$g_2(s) = \frac{1}{R} + \left(1 - \frac{1}{R}\right)s, \qquad J_2(s) = \frac{(1-s)\,[1 + g_2(s)]}{2}. \tag{7}$$

На рис. 1 показаны площади сечений двух профилей при $R = 2$. Площадь профиля 2 между концевыми сечениями меньше, что влияет и на локальную скорость, и на распределённую инерцию.

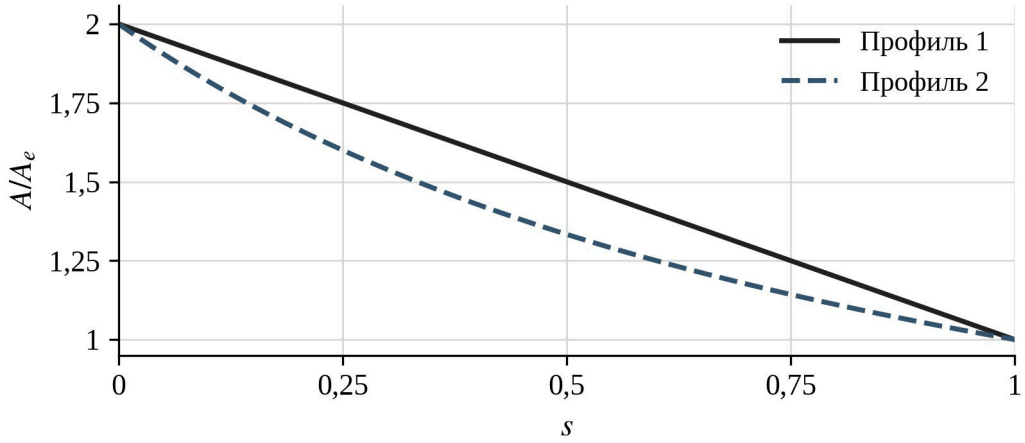


Рисунок 1. Продольное распределение площади сечения при $R = 2$

Критерий погрешности и численная проверка

Квазистационарное приближение соответствует исключению члена с локальным ускорением из (4). Амплитудный коэффициент в таком случае равен B. Для оценки относительной погрешности E разность амплитуд отнесена к полной амплитуде M. При допустимой погрешности δ, где $0 < \delta < 1$, предельное число Струхаля ω_δ найдено из условия $E \le \delta$

$$E = 1 - \frac{B}{M}, \qquad \omega_\delta = \frac{B}{J}\sqrt{(1-\delta)^{-2} - 1}. \tag{8}$$

Условие выполнено при $\omega \le \omega_\delta$. Для расчётного сравнения использованы $R = 2$ и $R = 3$ и сечения $s = 0,25$, $0,50$ и $0,75$. Значения J проверены адаптивным численным интегрированием g средствами SciPy. Для $\varepsilon = 0,05$ и $\omega = 0,5$, 1 и 3 рассчитаны сигналы давления по (4) с численно найденным J. Коэффициенты разложения получены дискретным преобразованием Фурье на 4096 равномерных отсчётах за период с исключением повторяющегося конечного отсчёта. При формулировке модели и подготовке вычислительного сценария использован ChatGPT (OpenAI). Для воспроизведения чисел достаточно выражений (3)–(8) и перечисленных параметров.

Результаты и обсуждение

Условие постоянства фазы вдоль канала

Пусть $\omega > 0$ и площадь строго убывает, так что $0 < g(s) < 1$ при $s < 1$. Из (5) следует, что постоянство φ по длине равносильно постоянству отношения $J/B = c > 0$. Из определения J получаем $J' = -g$, а из определения B — $B' = -2gg'$. Дифференцируя равенство $J = cB$, находим

$$-g = -2cgg', \qquad g'(s) = \frac{1}{2c}. \tag{9}$$

Следовательно, g линейна. Из концевых условий $g(0) = 1/R$ и $g(1) = 1$ определяется её наклон, совпадающий с наклоном профиля 2. Обратное утверждение следует подстановкой (7) в (3)

$$\frac{J_2}{B_2} = \frac{1}{2(1 - 1/R)}, \qquad \varphi_2 = arctan\frac{\omega}{2(1 - 1/R)}. \tag{10}$$

Таким образом, линейное распределение обратной площади необходимо и достаточно для пространственно постоянного фазового опережения в рамках данной модели. При этом амплитуда зависит от сечения и обращается в нуль на выходе. Поскольку отношение B_2/J_2 постоянно, предел применимости квазистационарного расчёта по амплитуде также одинаков во всех сечениях профиля 2 с ненулевым перепадом.

Частота равенства амплитуд

Внутри канала $g_1(s) < g_2(s)$, поскольку строго выпуклая функция g_1 лежит ниже хорды, совпадающей с g_2. Поэтому $B_1 > B_2$ и $J_1 < J_2$. В пределе низких частот преобладает конвективный член, и амплитуда выше у профиля 1. С увеличением частоты растёт относительный вклад инерции, и после пересечения амплитуд выше становится амплитуда профиля 2. Для любого $0 < s < 1$ равенство $M_1 = M_2$ выполняется при единственном положительном значении

$$\omega_c = \sqrt{\frac{B_1^2 - B_2^2}{J_2^2 - J_1^2}}. \tag{11}$$

На входе $B_1 = B_2$, и профиль 2 даёт большую амплитуду при любой положительной частоте вследствие большего значения J. Внутри канала фазовое опережение профиля 2 выше, поскольку его отношение J/B больше. Равенство амплитуд при ω_c поэтому сопровождается различием фаз. Амплитудные и фазовые характеристики в середине канала показаны на рис. 2.

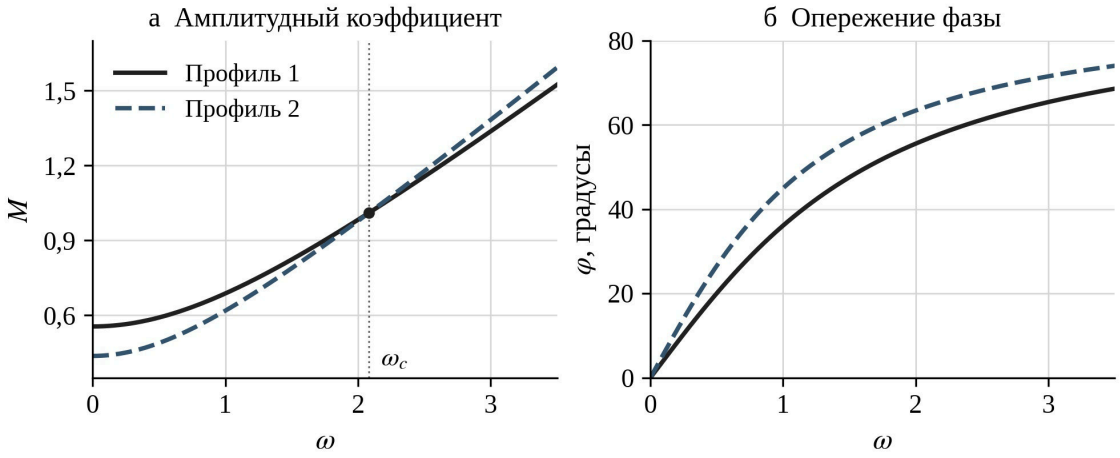


Рисунок 2. Амплитуда и фаза первой гармоники при $R = 2$ ***и*** $s = 0,50$

В табл. 1 приведены значения частоты пересечения ω_c, предельные числа Струхаля при допуске 5 % и фазы при $\omega = 1$. Для профиля 2 при $R = 2$ фазовое опережение равно 45° во всех рассматриваемых сечениях. Для профиля 1 оно уменьшается от 39,72° до 31,79° при перемещении от $s = 0,25$ к $s = 0,75$.

$$\omega = 1$$

Таблица 1. Частота равенства амплитуд, пределы при допуске 5 % и фазы при

R	s	ω_c	$\omega_{5\%,1}$	$\omega_{5\%,2}$	φ_1, °	φ_2, °
2	0,25	1,189	0,396	0,329	39,72	45,00
2	0,50	2,084	0,450	0,329	36,12	45,00
2	0,75	3,812	0,530	0,329	31,79	45,00
3	0,25	1,159	0,603	0,438	28,61	36,87
3	0,50	2,178	0,711	0,438	24,80	36,87
3	0,75	4,342	0,901	0,438	20,05	36,87

Например, при $R = 2$, $s = 0,50$, $L = 4$ м, $A_e = 0,04$ м², $Q_0 = 0,08$ м³/с, $\rho = 1000$ кг/м³ и $\varepsilon = 0,05$ значению $\omega = 1$ соответствует частота 0,0796 Гц. Расчёт даёт амплитуды первой гармоники 137,56 и 123,74 Па для профилей 1 и 2 соответственно. Квазистационарное приближение занижает их на 19,23 и 29,29 %. При тех же длине и выходной скорости амплитуды профилей в этом сечении совпадают при частоте около 0,166 Гц.

Вторая гармоника и применимость модели

Раскрытие квадрата в (4) даёт среднее безразмерное давление $\overline{P}$ и амплитуду второй гармоники $A_{P,2}$. При амплитуде первой гармоники $A_{P,1} = \varepsilon M$ получаем

$$\overline{P} = \frac{B}{2} + \frac{\varepsilon^2 B}{4}, \qquad A_{P,2} = \frac{\varepsilon^2 B}{4}, \qquad \frac{A_{P,2}}{A_{P,1}} \le \frac{\varepsilon}{4}. \tag{12}$$

Неравенство следует из $M \ge B$. При $\varepsilon = 0,05$ вторая гармоника составляет не более 1,25 % амплитуды первой гармоники. Численное интегрирование и извлечение гармоник подтвердили формулы с абсолютным расхождением менее 10^{-12} для всех проверенных безразмерных величин. Это проверка вычислений в пределах одной и той же модели. Экспериментальная точность для реального канала требует отдельной оценки.

Результаты описывают влияние геометрии на обратимый перепад давления в плавном жёстком канале при известном гармоническом расходе. Двумерное решение со свободной границей [1] учитывает иную кинематику, поэтому прямое количественное сопоставление фаз требует согласования формы канала, способа возбуждения и опорного давления. При резких переходах и заметной диссипации нужны дополнительные модели потерь. Для внезапного сужения напорного потока, например, экспериментальный перепад зависит от отношения площадей и числа Рейнольдса [9]. Если период возбуждения сравним со временем пробега волны давления, существенными становятся сжимаемость жидкости

и упругость стенок, которые учитываются в моделях гидравлических переходных процессов [7]. Представленные зависимости служат аналитическим ориентиром при сопоставлении плавных профилей в режиме, где указанные эффекты малы.

Заключение

Для полностью заполненного жёсткого канала получен комплексный коэффициент передачи от гармонического расхода к перепаду давления. Его действительная часть определяется локальным изменением скорости, а мнимая — инерцией жидкости между расчётным сечением и выходом.

Установлено, что пространственно постоянное фазовое опережение при ненулевой частоте обеспечивается линейным распределением обратной площади. Для двух каналов с одинаковыми концевыми площадями получена формула частоты равенства амплитуд в произвольном внутреннем сечении. При двукратном сужении в середине канала угловое число Струхаля в точке пересечения равно 2,084.

Получен критерий, по которому для заданного допуска определяется верхняя частота применения квазистационарного приближения. При пятипроцентном допуске, двукратном сужении и расчёте в середине канала предельные числа Струхаля равны 0,450 для линейной площади и 0,329 для линейной обратной площади.

Список литературы

1. Бабаджанов Ю.Т., Бабаджанова И.Ю. Нестационарная задача течения жидкости в канале переменного сечения // Innovatsion Texnologiyalar. – 2026. – Т. 62, № 2. – С. 49–57. – DOI: 10.70769/2181–4732.ITJ.2026–2.06.
2. Гуревич М.И. Теория струй идеальной жидкости. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1979. – 536 с.
3. Batchelor G.K. An Introduction to Fluid Dynamics. – Cambridge: Cambridge University Press, 2000. – DOI: 10.1017/CBO9780511800955.
4. Bruus H. Theoretical Microfluidics. – Oxford: Oxford University Press, 2007. – DOI: 10.1093/oso/9780199235087.001.0001.
5. Das A. Critical Channel Dimensions for Open-Channel Transition Design // Journal of Irrigation and Drainage Engineering. – 2011. – T. 137, № 11. – P. 735–742. – DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943–4774.0000344.
6. Hilhorst P.L.J., Verstraeten S.C.F.P.M., Zając K. et al. A Statistical Shape Modeling Approach for the Derivation of a Data-Driven Geometry-Aware Lumped Arterial Stenosis Model // International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering. – 2026. – T. 42, № 2. – DOI: 10.1002/cnm.70138.
7. Meniconi S., Brunone B., Ferrante M. Water-hammer pressure waves interaction at cross-section changes in series in viscoelastic pipes // Journal of Fluids and Structures. – 2012. – T. 33. – P. 44–58. – DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2012.05.007.

8. Seeley B.D., Young D.F. Effect of geometry on pressure losses across models of arterial stenoses // Journal of Biomechanics. – 1976. – T. 9, № 7. – P. 439–448. – DOI: 10.1016/0021–9290(76)90086-5.
9. Song X., Sun X., Li Y. et al. Enhanced prediction of pressure drops in pressurized systems with sudden contractions from circular to annular cross sections // Physics of Fluids. – 2025. – T. 37, № 1. – Art. 015237. – DOI: 10.1063/5.0249779.
10. Wang J., Tan W., Zhu C. A generalized reduced-order model for trans-stenotic pressure drop with and without a guidewire // Journal of Biomechanics. – 2024. – T. 176. – Art. 112306. – DOI: 10.1016/j.jbiomech.2024.112306.
11. Young D.F., Tsai F.Y. Flow characteristics in models of arterial stenoses. II. Unsteady flow // Journal of Biomechanics. – 1973. – T. 6, № 5. – P. 547–559. – DOI: 10.1016/0021–9290(73)90012-2.

References

1. Babajanov Y.T., Babajanova I.Y. [Unsteady problem of fluid flow in a channel of variable cross-section] // Innovatsion Texnologiyalar. – 2026. – Vol. 62, No. 2. – P. 49–57. – DOI: 10.70769/2181–4732.ITJ.2026–2.06.
2. Gurevich M.I. [Theory of jets of an ideal fluid]. – 2nd rev. and enl. ed. – Moscow: Nauka, 1979. – 536 P. (In Russ.).
3. Batchelor G.K. An Introduction to Fluid Dynamics. – Cambridge: Cambridge University Press, 2000. – DOI: 10.1017/CBO9780511800955.
4. Bruus H. Theoretical Microfluidics. – Oxford: Oxford University Press, 2007. – DOI: 10.1093/oso/9780199235087.001.0001.
5. Das A. Critical Channel Dimensions for Open-Channel Transition Design // Journal of Irrigation and Drainage Engineering. – 2011. – Vol. 137, No. 11. – P. 735–742. – DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943–4774.0000344.
6. Hilhorst P.L.J., Verstraeten S.C.F.P.M., Zając K. et al. A Statistical Shape Modeling Approach for the Derivation of a Data-Driven Geometry-Aware Lumped Arterial Stenosis Model // International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering. – 2026. – Vol. 42, No. 2. – DOI: 10.1002/cnm.70138.
7. Meniconi S., Brunone B., Ferrante M. Water-hammer pressure waves interaction at cross-section changes in series in viscoelastic pipes // Journal of Fluids and Structures. – 2012. – Vol. 33. – P. 44–58. – DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2012.05.007.
8. Seeley B.D., Young D.F. Effect of geometry on pressure losses across models of arterial stenoses // Journal of Biomechanics. – 1976. – Vol. 9, No. 7. – P. 439–448. – DOI: 10.1016/0021–9290(76)90086-5.
9. Song X., Sun X., Li Y. et al. Enhanced prediction of pressure drops in pressurized systems with sudden contractions from circular to annular cross sections // Physics of Fluids. – 2025. – Vol. 37, No. 1. – Art. 015237. – DOI: 10.1063/5.0249779.

10. Wang J., Tan W., Zhu C. A generalized reduced-order model for trans-stenotic pressure drop with and without a guidewire // Journal of Biomechanics. – 2024. – Vol. 176. – Art. 112306. – DOI: 10.1016/j.jbiomech.2024.112306.
11. Young D.F., Tsai F.Y. Flow characteristics in models of arterial stenoses. II. Unsteady flow // Journal of Biomechanics. – 1973. – Vol. 6, No. 5. – P. 547–559. – DOI: 10.1016/0021–9290(73)90012-2.

Статья поступила в редакцию: 21.10.2026
Статья принята к публикации: 27.10.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 623.442.58:519.224.2

DOI: 10.32743/UniTech.2026.152.11.23627

Настройка спортивной винтовки на экстремальную кучность: теоретический анализ метода Игоря Жукова

Богословский Владимир Николаевич
д-р. техн. наук
Российская Федерация, г. Москва
E-mail: vnbog@mail.ru

Adjusting a sports rifle for extreme accuracy: theoretical analysis of Igor Zhukov's method

Bogoslovsky Vladimir Nikolayevich
Dr. Tech. Sci
Russian Federation, Moscow

Аннотация

В статье впервые выполнен комплексный теоретический анализ метода двукратного чемпиона Европы по бенчресту Игоря Жукова по настройке спортивной или охотничьей винтовки на экстремальную кучность. Метод рассмотрен как последовательная адаптивная процедура, включающая определение безопасной начальной длины патрона, установление рабочего диапазона навесок, предварительный отбор перспективных навесок по группам из трех выстрелов, пошаговое изменение глубины посадки пули, поиск широкой кучной полки и окончательную проверку найденной настройки. Для исследования отдельных этапов метода применены модели функции случайных аргументов, «нагрузка–прочность», доверительные и толерантные интервалы, статистическое моделирование, дисперсионный анализ, критерии Стьюдента и Уэлча. Показано, что неопределённости, свойственные малым группам, уменьшаются за счёт последовательного накопления данных на следующих шагах по навеске и глубине посадки пули, что позволяет постепенно исключать неперспективные варианты по навеске и статистически обоснованно выбрать кучную полку по посадке.

Результаты исследования подтверждают физическую обоснованность и статистическую состоятельность метода Игоря Жукова как практической системы настройки винтовки на предельно достижимую для конкретного комплекса «винтовка–патрон» кучность. Теоретические выводы согласуются с экспериментальными данными, полученными для пяти винтовок, у которых настройка по методу Игоря Жукова дала кучность на уровне лучших

Библиографическое описание: Богословский В.Н. Настройка спортивной винтовки на экстремальную кучность: теоретический анализ метода Игоря Жукова // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23627

результатов для соответствующих классов винтовок. Статья будет полезна исследователям спортивного стрелкового нарезного оружия и спортсменам-стрелкам. Работа выполнена в интересах международного спортивного стрелкового сообщества по инициативе автора и на его собственные средства с использованием открытых источников информации.

Abstract

This article presents the first comprehensive theoretical analysis of the method developed by Igor Zhukov, a two-time European benchrest champion, for tuning a sporting or hunting rifle for extreme precision. The method is examined as a sequential adaptive procedure comprising the determination of a safe initial cartridge overall length, identification of a working range of powder charge weights, preliminary screening of promising charge weights using three-shot groups, incremental adjustment of bullet seating depth, identification of a broad precision plateau, and final verification of the selected configuration. Individual stages of the method are investigated using models of functions of random variables, stress–strength models, confidence and tolerance intervals, statistical simulation, analysis of variance, and Student’s and Welch’s t-tests. The analysis shows that the uncertainties inherent in small shot groups are reduced through the sequential accumulation of data during subsequent adjustments to charge weight and bullet seating depth. This allows unpromising charge weights to be progressively eliminated and a seating-depth precision plateau to be selected on a statistically sound basis. The results confirm that Igor Zhukov’s method is physically sound and statistically valid. It works as a practical system for tuning a rifle to the maximum accuracy achievable for a specific rifle–cartridge combination. The theoretical conclusions are consistent with experimental data for five rifles, in which tuning by Igor Zhukov’s method yielded precision at the level of the best results for the respective classes of rifles. The article will be useful to researchers of sporting firearms, competitive shooters, hunters, and all enthusiasts of precision shooting with rifled firearms. The work was carried out for the benefit of the international sport shooting community, on the author’s initiative and at the author’s own expense, using open-source information.

Ключевые слова: метод Игоря Жукова, настройка спортивной винтовки, кучная полка, статистическое моделирование, экстремальный размер группы, доверительный интервал.

Keywords: Igor Zhukov’s method, target-rifle tuning, precision node, statistical simulation, extreme spread, confidence interval.

Введение

Настройка спортивной или охотничьей винтовки на экстремальную кучность является ключевым вопросом их подготовки к соревнованиям или к охоте. В ряду различных технологий настройки [1, 3–9] метод двукратного чемпиона Европы по бенчресту Игоря Жукова занимает особое место. Его особенность — опора на конкретные, проверяемые цифры на каждом шаге настройки. В его представлении точность винтовки – это система, основанная на жестких стандартах, и он видит ее как результат последовательных мероприятий, финальной частью которых является настройка на экстремальную кучность. Под экстремальной кучностью Игорь Жуков понимает наилучшую техническую кучность высокоточного комплекса при конкретном сочетании характеристик ствола, пули и патрона,

определяемую по угловому размеру вылета пуль из ствола на дистанции 100 м [1, 2]. При этом речь идёт не только о достижении собственного предела системы, но и о высоком результате в абсолютном выражении. Техническая кучность комплекса «винтовка+патрон» в его понимании зависит от различий в направлении вылета пуль из ствола, поэтому нужно найти такую комбинацию навески пороха и глубины посадки пули, при которой пули, выходя из ствола в немного разное время и с немного разной скоростью, получали бы минимальное различие в направлении вылета. При стрельбе на большие дальности на траектории пуль, вышедших из ствола в одинаковом направлении, дополнительно начинают влиять разбросы скорости и баллистического коэффициента, поэтому в настройку патрона Игорь Жуков включает также операции, обеспечивающие минимальный разброс скоростей и баллистического коэффициента пуль. В философии метода Игоря Жукова центральное место занимает настройка не по навеске, а по глубине посадки пули. Он исходит из того, что навеска больше определяет скорость пули, а посадка – главную часть настройки кучности.

Первые варианты метода Игоря Жукова были созданы на основе рекомендаций и в содружестве с лучшими бенчрест-стрелками мира и опробованы еще в начале 2000-х. В дальнейшем метод непрерывно совершенствовался [1, 2]. Однако до настоящего времени отсутствовало его теоретическое обоснование, что в какой-то мере сдерживало его применение.

Целью статьи является теоретический анализ, исследование научной обоснованности, статистической достоверности и ограничений в применении метода Игоря Жукова.

Материалы и методы

При исследовании использованы физические модели и методы статистического анализа, а также результаты натурных экспериментов. В качестве примера для теоретического анализа выбраны спортивная винтовка в калибре 6.5x47 Lapua с гильзой Lapua, порохом VihtaVuori №150, пулей Berger 130 gr VLD и капсюлем Federal Gold GM210M, и охотничья винтовка в калибре .223 Remington с гильзой Lapua, порохом VihtaVuori №133, пулей SMK 52 gr, капсюлем Federal Premium GM205M.

В методе Игоря Жукова реализуется несколько тесно связанных между собой подзадач. В современном исполнении [1, 2] их можно описать так: определение стартовой длины патрона; определение рабочего диапазона навески пороха; первые шаги по навеске; шаги по глубине посадки пули; поиск кучной полки по посадке; выбор точки настройки; финальная проверка экстремальной кучности. Проведем теоретический анализ каждого из представленных шагов.

Определение стартовой длины патрона

При попытке вынуть нестреляный патрон из патронника пуля может остаться в стволе, порох рассыпется и участие в соревновании придется прервать для выбивания пули и чистки ствола и патронника от пороха, а охота на этом может закончиться. Чтобы этого не случилось, нужно найти фактическую точку закусывания (ФТЗ), которая определяется по сдвигу пули в дульце гильзы при закрывании затвора, и отступить от этой точки на некоторое расстояние. ФТЗ можно определить расчетом, но проще и практичнее ее определить,

выдвинув пулю в холостом патроне примерно на 0,02″ больше ожидаемой длины на ФТЗ и однократно закрыв затвор, извлечь патрон и сделать замер его новой длины. После этого нужно отступить от ФТЗ примерно на 0,01″ или многократно (до 10 раз) дослать патрон в патронник и выбросить его из патронника, чтобы пуля еще немного подвинулась в гильзе [2]. Длина такого патрона принимается за безопасную точку старта (БТС) [2]. При необходимости определяется точка касания (ТК), но это не обязательная операция. Патроны первых серий снаряжаются по длине на БТС, а если их длина ограничивается размерами магазина или условиями применения, то на максимально возможной длине. Это задает четкий стартовый размер патрона и сразу вносит конкретику в максимально возможный диапазон исследования кучности по глубине посадки пули. Если гильзы подготовлены тщательно, разброс усилия страгивания во всей их партии небольшой, и для теста достаточно одного патрона, который после теста кладется на хранение и используется в последующем контроле сгорания нарезов.

Теоретический расчет стартовой длины патрона

Схема расположения пули в гильзе и стволе приведена на рис. 1. Задачу определения длины патрона на БТС можно сформулировать так. Необходимо найти самую большую длину патрона, на которой безопасно делать выстрелы или разряжать винтовку без закусывания пули. Если бы пуля была стальной, то максимальная длина патрона определялась бы точкой касания пули нарезов пульного входа. Но оболочка пуль изготавливается из медного сплава, и внутри нее свинец.

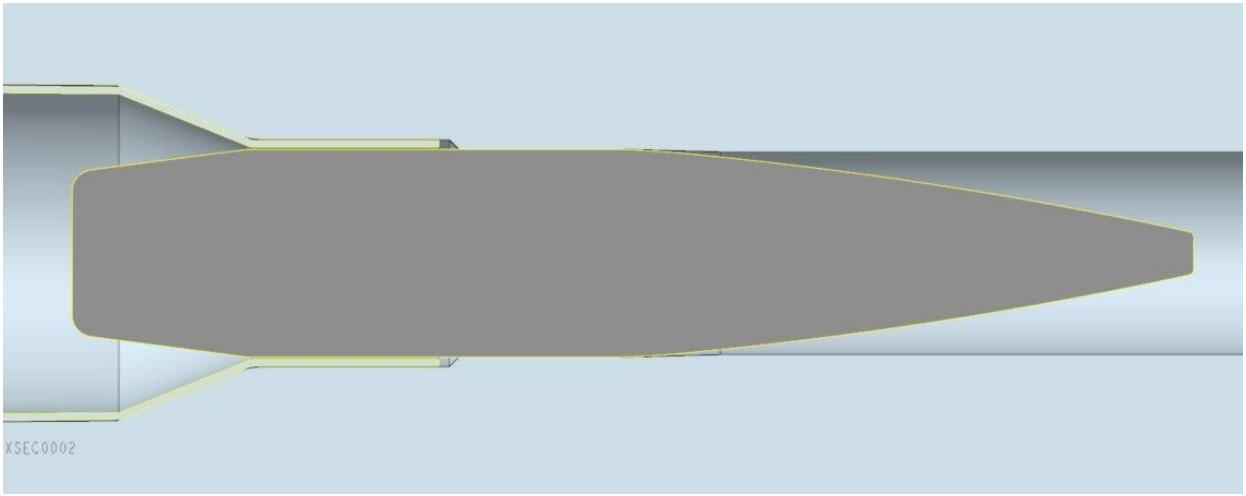


Рисунок 1. Схема расположения пули в гильзе и стволе

Такую пулю можно немного задвинуть в нарезы без сдвига в дульце за счет деформации ее поверхности. При входе в нарезы тонкая оболочка пули прогибается и пластически деформируется, подминая свинец (рис. 2).

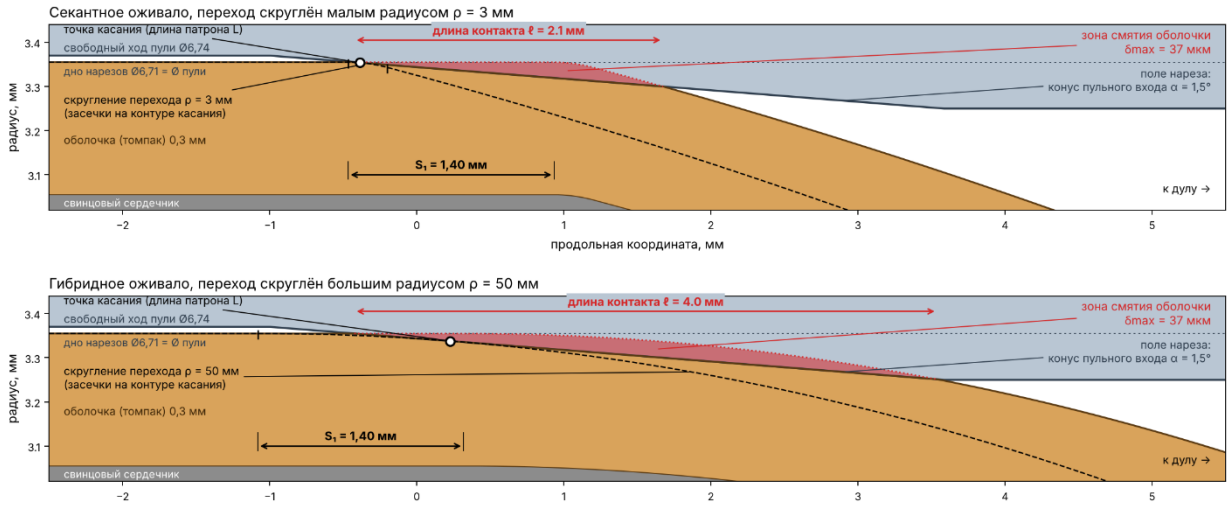


Рисунок 2. Схема пули в нарезах пульного входа. Вверху секантное, внизу гибридное оживало

Когда при закрытии затвора усилие сопротивления нарезов превышает усилие страгивания пули, она задвигается в дульце гильзы и патрон меняет длину. Поля нарезов пульного входа имеют очень маленький угол наклона (около 1,5 градуса), поэтому сила трения играет определяющую роль как при задвигании пули в нарезы, так и при выбрасывании патрона из патронника.

Для теоретического анализа процесса страгивания пули и определения БТС рассмотрим схему, в которой два разных вопроса и разные модели.

1. **Длина на точке сдвига L_1** является функцией случайных аргументов.

Схема модели приведена на рис. 3.

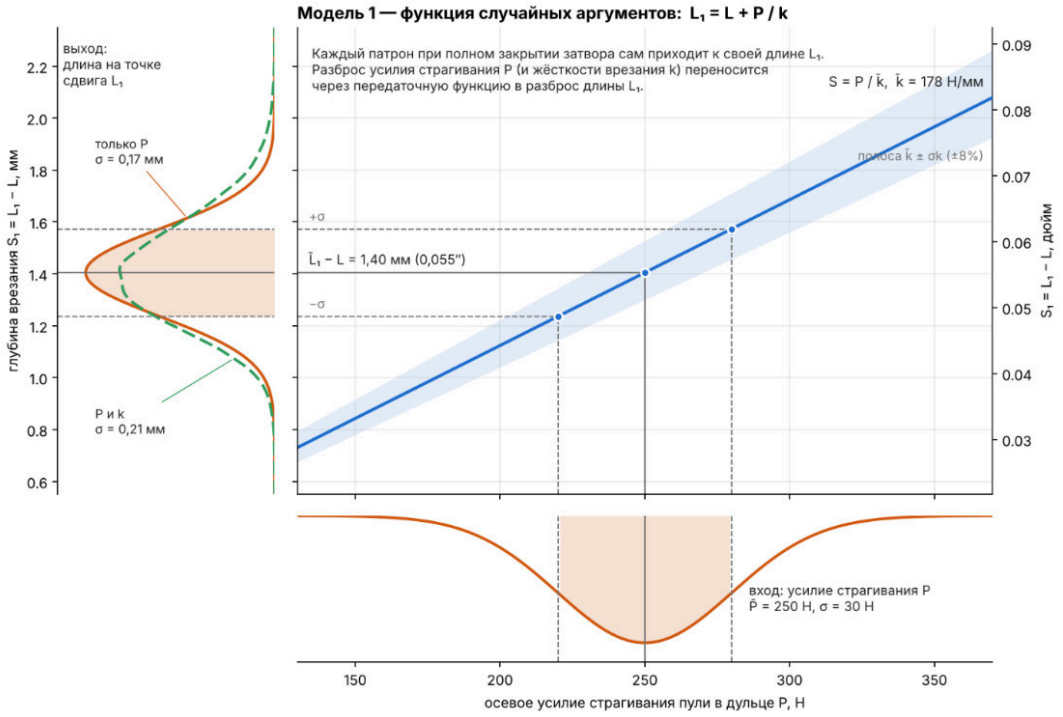


Рисунок 3. Схема модели определения длины патрона на точке закусывания

При полном закрытии затвора каждый патрон сам приходит к своей длине. Длина L_1 получается пересчётом случайных параметров патрона:

$$L_{1i} = L_i + \frac{P_i}{k_i}$$

Здесь: P_i— усилие страгивания пули в дульце; k_i— жёсткость врезания (оболочка, трение); L_i — точка касания, которая плавает из-за небольшого разброса размеров оживала от пули к пуле. Задача состоит в том, чтобы найти распределение функции по распределениям аргументов. При малых коэффициентах вариации можно применить нормальный закон и линеаризацию:

$$\overline{L}_1 = \overline{L} + \frac{\overline{P}}{\overline{k}}, \qquad \sigma^2_{L_1} = \sigma^2_L + \left(\frac{\sigma_P}{\overline{k}}\right)^2 + \left(\frac{\overline{P}\,\sigma_k}{\overline{k}^2}\right)^2$$

Если разброс k большой, распределение отношения P/k получается несимметричным. Тогда надёжнее метод Монте-Карло [16].

2. Безопасная точка старта L_2: модель «нагрузка-прочность»

Схема модели приведена на рис. 4.

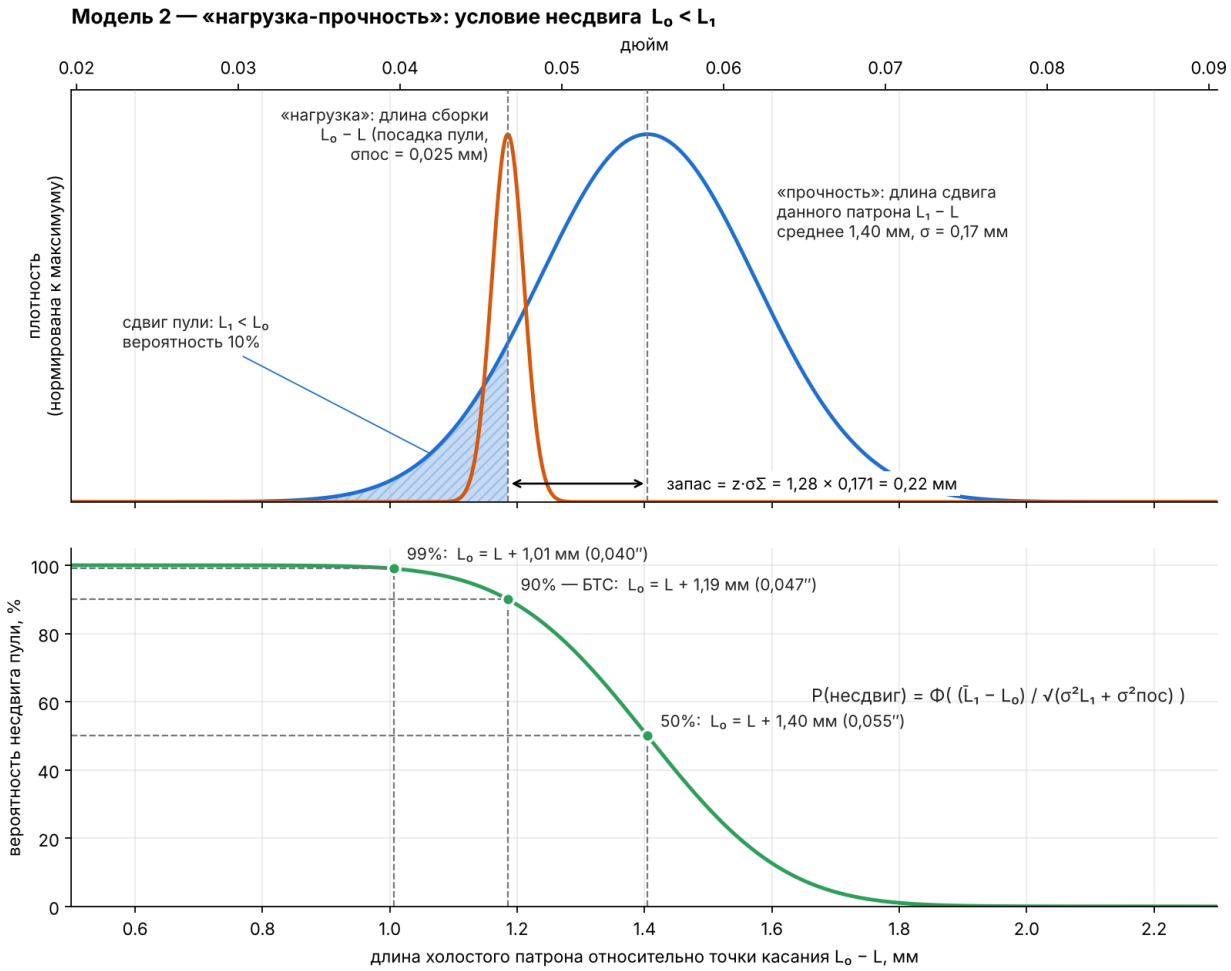


Рисунок 4. Схема модели «нагрузка-прочность» для определения безопасной точки старта (БТС)

Это классическая статистическая модель интерференции двух независимых случайных величин при однократном нагружении, без деградации во времени [10]. Записать её можно двумя эквивалентными способами. В силах: нагрузка — сопротивление врезанию при заданной длине патрона, $F = k\,(L_0 - L)$; прочность — усилие страгивания P; несдвиг: $P > k\,(L_0 - L)$. В длинах (удобнее для практики): прочность — собственная длина сдвига (закусывания) данного патрона L_{1i} с распределением из п. 1; нагрузка — длина, на которую патрон собран, L_0 (номинал плюс разброс посадки пули $\sigma_{\text{пос}}$); несдвиг: $L_0 < L_{1i}$. Вероятность несдвига и длина на БТС [10]:

$$\Pr = \Phi\left(\frac{\overline{L}_1 - L_0}{\sqrt{\sigma_{L_1}^2 + \sigma_{\text{пос}}^2}}\right) = \gamma \quad \Rightarrow \quad L_2 = \overline{L}_1 - z_\gamma \sqrt{\sigma_{L_1}^2 + \sigma_{\text{пос}}^2}$$

Запас надёжности здесь — расстояние между средней «прочностью» $\overline{L}_1$ и «нагрузкой» L_0, выраженное в долях суммарного σ (z = 1,28 для 90%).

Почему удобнее формулировка в длинах. Опыт с полным закрытием затвора прямо даёт выборку «прочности» в миллиметрах или дюймах: каждый патрон показывает свою длину L_{1i}. Знать P, k и их разбросы по отдельности тогда не нужно. Достаточно оценить по 8–10 патронам $\overline{L_1}$ и s_{L_1} и подставить их в формулу для L_2. Разброс посадки пули $\sigma_{\text{пос}}$ берётся из замеров партии.

Пример с номинальными значениями: $\overline{L_1} = L + 1,40$мм; $\sigma_{L_1} \approx 30/178 \approx 0,17$мм; $\sigma_{\text{пос}} \approx 0,025$ мм. Отсюда $L_2 \approx L + 1,40 - 1,28 \cdot 0,17 \approx L + 1,18$ мм (L + 0,046″). Таким образом, обоснованность процедуры определения длины патрона на БТС подтверждается теоретической моделью, а расчеты подтверждают практику отступа от ФТЗ на ≈ 0,01″, что создает достаточный запас. При малой выборке вместо нормального квантиля следует использовать коэффициент статистического толерантного предела. Для одностороннего нормального 90/90-толерантного предела при $n = 10$ коэффициент составляет приблизительно 2,07, а не 1,28 [11]. NIST [11] отдельно отмечает, что при малых выборках, особенно $N \leq 10$, предпочтителен расчёт через нецентральное t-распределение. Без этой поправки БТС получится длиннее, чем нужно. Но для определения длины патрона на БТС не требуется очень высокой точности, потому что это длина на первом шаге настройки патрона, и кучная полка как правило находится не на первом шаге на БТС, а на несколько шагов ниже длины на БТС. Тем не менее, проделать операции по определению длины патрона на ФТЗ и БТС нужно очень тщательно.

Определение рабочего диапазона навески

От минимальной навески, выбираемой из мануала производителя или опыта, с шагом 0,3–0,5 gr по навеске снаряжают по одному патрону и, делая шаги с увеличением навески, получают точку с признаками начала передоза («не так» открывается затвор, не такой вид капсюля, на донце гильзы появился след от выбрасывателя, увеличился диаметр проточки и т. д.), и делают от нее отступ. На практике стрелки определяют безопасную границу по своему опыту и привычным для них признакам. В методе Игоря Жукова безопасная граница «на все случаи» определяется отступом от границы с первыми признаками передоза примерно на 1 gr и полученное значение принимают за первую рабочую навеску. Это дает верхнее ограничение по навеске, обеспечивающее безопасное использование спортивного или охотничьего оружия. Поскольку довольно часто нужно искать кучную полку в области высоких скоростей, она уже не будет пропущена. Такой отступ следует рассматривать как эмпирическое правило: универсальность фиксированного отступа и допустимость дальнейшего повышения заряда из приведённых расчётов не следуют.

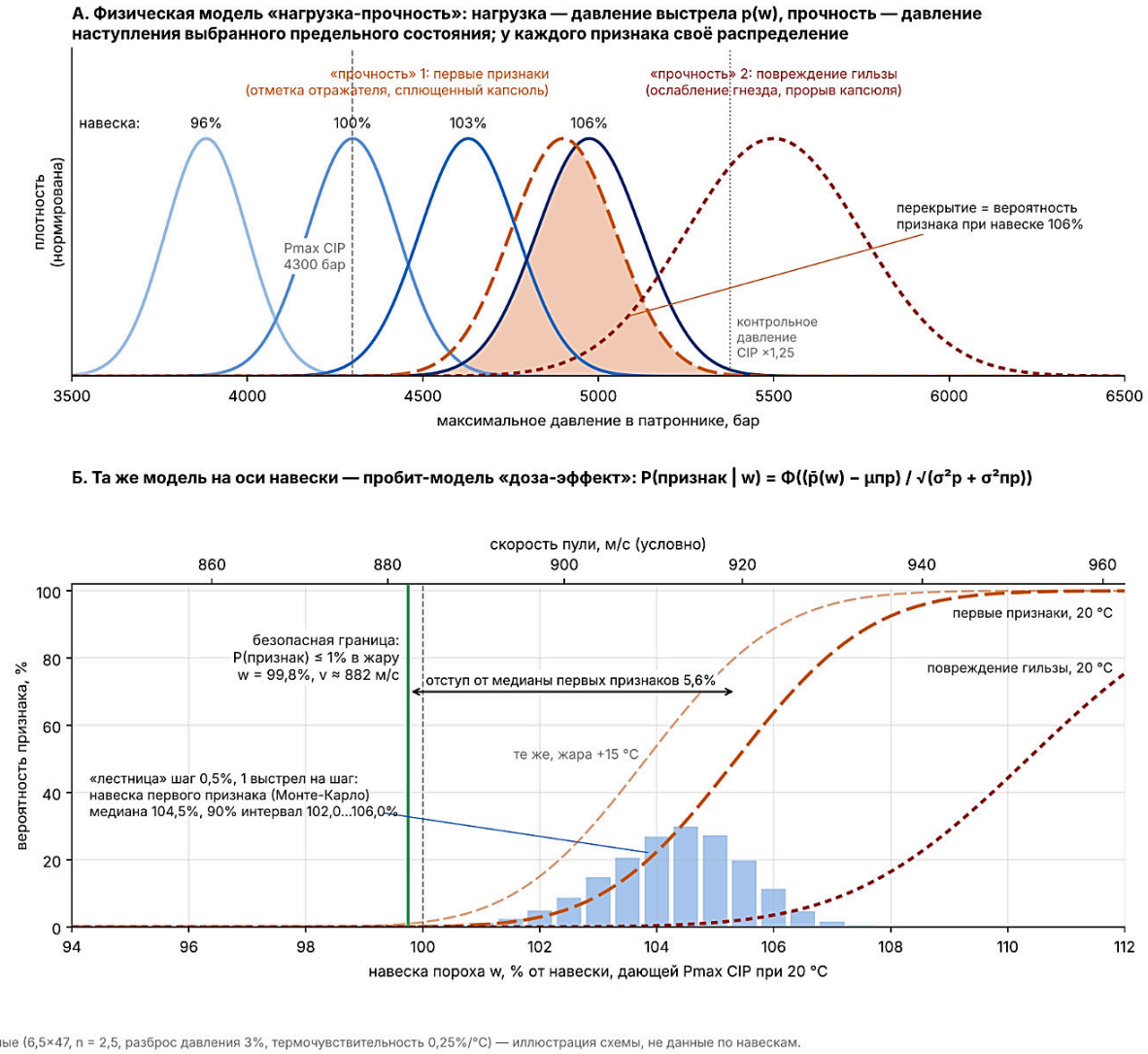
Как представляет этот процесс теория

Первое появление признаков повышенного давления не задаёт единственной, строго определённой границы навески. Результат зависит как от разброса давления между выстрелами, так и от состояния гильз и капсюлей. Поэтому «лестницу», в которой на каждой ступени регистрируют наличие или отсутствие выбранного признака, следует рассматривать как статистическое испытание. Эту задачу описывает модель «нагрузка — прочность»

с несколькими признаками «нагрузки» и «прочности» (рис. 5, 6). На рисунке 5 она представлена на оси давления, а на рисунке 6 — на оси навески. Это два представления одной модели, а не два независимых случая.

А. Модель «нагрузка — прочность» на оси давления (рис. 5)

Нагрузка — максимальное давление отдельного выстрела p. При одинаковых навеске и температуре оно меняется от выстрела к выстрелу. **Прочность** в этой модели — давление $p_{s,j}$, при котором наступает выбранное предельное состояние j: появляются первые признаки повреждения гильзы или капсюля. Прочность ствола и затвора в данном примере не моделируется, поскольку они имеют запасы прочности намного больше, чем гильзы. Для каждого состояния рассматривается своё распределение порогового давления.



Числа условные (6,5×47, n = 2,5, разброс давления 3%, термочувствительность 0,25%/°C) — иллюстрация схемы, не данные по навескам.

Рисунок 5. Модель «нагрузка — прочность» на оси давления

Примем нормальные распределения нагрузки и прочности и независимость наблюдений:

$$p \sim N\left(\overline{p}, \sigma_p^2\right), \qquad p_{s,j} \sim N\left(\mu_j, \sigma_j^2\right) \tag{1}$$

Здесь $\bar{p}$ и σ_p — среднее давление и его стандартное отклонение; μ_j и σ_j — среднее значение и стандартное отклонение порога выбранного состояния.

Второй параметр записи *N* обозначает дисперсию. Если нагрузка и прочность статистически независимы, вероятность появления признака равна:

$$P_j(w,T) = \Pr\left(p \geq p_{s,j}\right) = \Phi\left(\frac{\overline{p}(w,T) - \mu_j}{\sqrt{\sigma_p^2 + \sigma_j^2}}\right) \quad (2)$$

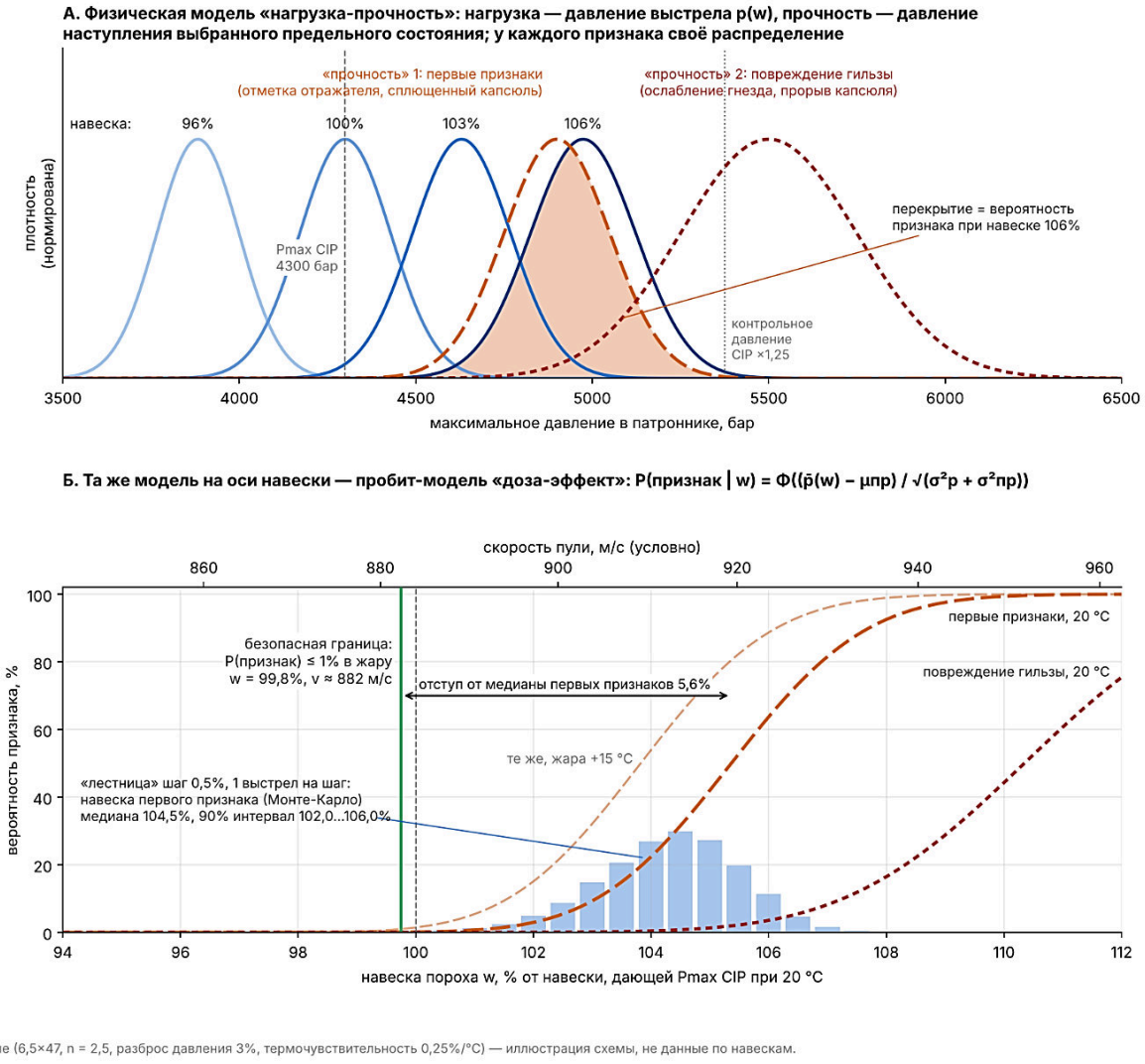
Здесь Ф — функция распределения стандартной нормальной величины. Таким образом, вероятность определяется разностью среднего давления и среднего порога, а также суммарным разбросом обеих величин. На рисунке 5 синие кривые показывают распределения давления при разных навесках. Оранжевая штриховая кривая соответствует первым признакам, тёмно-красная пунктирная — повреждению гильзы или капсюля. CIP [12] задаёт только Pmax ≈4300 бар для 6,5×47 Lapua [12]. В примере для них условно приняты соответственно μ_1 = 4900 бар, σ_1 = 150 бар и μ_2 = 5500 бар, σ_2 = 250 бар. Кривые приведены к одинаковой высоте для удобства сравнения. Их взаимное расположение наглядно показывает сближение нагрузки и прочности, но площадь перекрытия кривых не равна вероятности появления признака. Вероятность рассчитывается по формуле (2). Главная мысль модели: у одной нагрузки существует несколько «прочностей» — по числу рассматриваемых предельных состояний. Поэтому первые признаки и повреждение компонентов нельзя объединять в одну границу.

Б. Модель «навеска — эффект» на оси навески (рис. 6)

Связь навески с давлением. Для перехода к оси навески в исходной модели принята приближённая зависимость среднего давления:

$$\overline{p}(w,T) = p_0\left(\frac{w}{w_0}\right)^n [1 + k_T\,(T - T_0)] \quad (3)$$

Здесь *w* — навеска; w_0 и p_0 — эталонные навеска и среднее давление при температуре T_0; *n* — показатель нелинейности; k_t — относительный температурный коэффициент давления.



Числа условные (6,5×47, n = 2,5, разброс давления 3%, термочувствительность 0,25%/°C) — иллюстрация схемы, не данные по навескам.

Рисунок 6. Модель «навеска — эффект» на оси навески

В расчете приняты n = 2,5 и $\sigma_p/\bar{p}$ = 3 %. Эти значения не являются универсальными характеристиками порохов. На рисунке 6 по нижней оси отложена навеска в процентах от w_0, по верхней — условно соответствующая ей скорость пули, по вертикали — вероятность признака. Подстановка зависимости (3) в формулу (2) даёт S-образную кривую «навеска — эффект». При температуре T_0 навеска для вероятности 50 % состояния j, равна

$$w_{50,j} = w_0 \left(\frac{\mu_j}{p_0} \right)^{1/n} \tag{4}$$

Ширину переходной области вблизи этой точки приближённо характеризует

$$\sigma_{w,j} \approx \frac{w_{50,j}}{n} \frac{\sqrt{\sigma_p^2 + \sigma_j^2}}{\mu_j} \tag{5}$$

В формуле (5) разброс давления берётся при $w = w_{50,j}$ и $T = T_0$. Это локальное приближение: нелинейное преобразование оси давления не делает всю кривую точно нормальной на оси навески.

Температура и условная вероятностная граница

При положительном k_t повышение температуры увеличивает давление и сдвигает кривую в сторону меньших навесок. В исходном примере нагрев от +20 до +35 °C при k_t = 0,25 %/°C повышает расчётное среднее давление на 3,75 %. Поэтому одинаковая навеска при разных температурах имеет разную вероятность появления признака. Для выбранного состояния зададим условие $P_j(w, T_{max}) \le \gamma$. В первом приближении соответствующая граница равна

$$w_{\gamma,j} \approx w_{50,j} - z_{1-\gamma}\sigma_{w,j} - \frac{w_{50,j}\,k_T\,\Delta T_{\max}}{n} \qquad (6)$$

Здесь $\Delta T_{max} = T_{max} - T_0$; $z_{1-\gamma} = \Phi^{-1}(1 - \gamma)$ — квантиль стандартного нормального распределения. Второе слагаемое учитывает разброс нагрузки и порога, третье — температурный сдвиг. Оба поправочных слагаемых записаны в линейном приближении. В примере для первых признаков приведены $w_{50,1} \approx 105{,}4$ % и $\sigma w_{,1} \approx 1{,}8$ процентного пункта. Здесь проценты относятся к эталонной навеске, а не к вероятности события. Значение γ задаёт условный критерий модели и само по себе не устанавливает допустимый риск эксплуатации оружия.

Что показывает «лестница»

Голубая гистограмма на рисунке 6 описывает распределение навески первого обнаруженного признака. Для приведённой схемы моделирования — один выстрел на ступень при шаге 0,5 % эталонной навески — указаны медиана 104,5 % и интервал 102–106 %, содержащий 90 % результатов. Первый признак — случайный результат последовательности испытаний. Поэтому даже при неизменных параметрах модели повторные «лестницы» дают разные значения. В примере медиана первого обнаружения, 104,5 %, ниже навески 50-процентной вероятности отдельного признака, 105,4 %: признак может возникнуть на одной из предшествующих ступеней. По одному первому обнаружению нельзя надёжно определить одновременно положение и ширину переходной области. Для оценки её параметров рассматриваются регрессионный анализ и метод Диксона — Муда («вверх — вниз») [13]. Первый признак — не жёсткая граница, а одна реализация случайного процесса. Модель позволяет объяснить разброс таких результатов и влияние температуры, но малая вероятность выбранного внешнего признака не тождественна доказанной безопасности. Отсюда три вывода: Результат лестницы случаен. Два стрелка с одинаковыми винтовками и патронами получат «предел», различающийся до 4 %. Причина не в разных винтовках, а в том, что каждый выстрел — случайная проба. Медиана лестницы (104,5%) ниже медианы кривой (105,4%). Чем больше ступеней пройдено, тем раньше по навеске хотя бы один выстрел «пробьёт» прочность. Первый признак — это не граница, а одна точка из распределения. Отступ от него обязан покрывать и разброс самой оценки. Зелёная линия — безопасная граница. Это навеска, при которой вероятность первого признака не выше 1% в самых жарких условиях применения, то есть точка 1% на бледной кривой: 99,8% навески, скорость около 882 м/с. Это и есть «почти верхняя граница по скорости». Стрелка «отступ 5,6%» — расстояние от навески 50-процентной вероятности первых признаков при 20 °C

(105,4 %) до безопасной границы; от медианы первого обнаружения на лестнице (104,5 %) отступ составляет около 4,7 %. Примерно 4% в нём покрывают разброс давления и прочности, примерно 1,5% — температуру. Пунктир на 100% — навеска, дающая ровно P_{max} CIP при 20 °C. В этом примере безопасная граница практически совпала с ней, так и должно получаться, когда запасы в стандарте выбраны разумно. Но совпадение не обязательно: при другом порохе, гильзах или ином разбросе граница может оказаться и выше, и ниже 100%. При навеске около 37 gr отступ в 1 gr составляет около 2,7 %. По приведённой модели при таком отступе от медианы первого обнаружения вероятность первых признаков давления составляет около 2 % при +20 °C и около 12 % при +35 °C, а вероятность повреждения гильзы или капсюля не превышает 0,2 %. Таким образом, отступ в 1 gr даёт большой запас по повреждению компонентов, но не исключает появления первых признаков в жару: модельная граница 1 % для первых признаков лежит примерно на 1,7 gr ниже медианы первого обнаружения. Поэтому продвигаться выше границы с отступом в 1 gr допустимо лишь с учётом температуры применения и при отсутствии признаков давления. Впрочем, кучная навеска чаще всего лежит ниже этой границы.

Следующий шаг – выбор навесок

Следующей практической операцией в методе Игоря Жукова является выбор 4 навесок, отделенных друг от друга на 0,2–1 gr в зависимости от калибра. Для калибров .223 Rem и 6 mm PPC логичен шаг 0,2 gr, для средних калибров 0,3 gr, для крупных калибров .338, 33XC, . 375 шаг 1 gr. Шаги по навеске определены из многолетнего опыта. В методе предлагается на первом шаге на посадке на БТС сделать по 3 выстрела на каждой навеске, 4 навески, 12 выстрелов. Таким образом, схема настройки стартует с верхнего диапазона по навеске и посадке, и задачу на этом этапе следует понимать как предварительный способ поиска навесок-кандидатов при максимальной длине патрона: не выбрать «лучшую навеску», а сузить диапазон до одного-двух шагов, после чего уточнять его на следующих шагах.

Чтобы понять, насколько достоверны могут быть полученные данные для принятия решения на первом шаге, определим вероятные интервалы нахождения истинного значения кучности с доверительной вероятностью 80 %. Для 4 групп по 3 выстрела с навесками 36,7, 37,0, 37,3, 37,6 gr слева направо введем следующие условные размеры групп: 1 – 0,2 MOA, 2 – 0,4 MOA, 3 – 0,6 MOA и 4 – 0,5 MOA. По фактическим значениям лучшая кучность у первой группы (рис. 7a, точки). Однако она определена по одной группе из 3 выстрелов на каждой навеске. В методе Игоря Жукова число выстрелов в группе 3 выбрано для того, чтобы сэкономить патроны и пройти как можно больше точек по навеске и посадке. Но достаточно ли трех выстрелов для принятия решения по каждой точке? Оценим статистическую достоверность этих цифр. На рис. 7a приведены вероятные интервалы кучности для первого шага по посадке (на БТС). Видно, что почти все интервалы перекрываются, а это означает, что даже с достаточно низкой доверительной вероятностью 80 % в нашем примере по одному опыту пока нельзя отдать предпочтение какой-либо одной группе. Можно лишь сказать, что среднее значение группы 1 с вероятностью 80 % лучше среднего значения группы 3. Но как раз именно об этом и говорится в методе, и в таких моментах проявляется его сила. Если ни одной группе нельзя отдать предпочтение, но при этом кучность хотя бы на одной навеске на

уровне ожидаемой, делается следующий шаг по глубине посадки пули со всеми навесками, который повышает статистическую достоверность данных. Если же кучность намного ниже ожидаемой (например, у всех 4 групп кучность хуже, чем 0,5 МОА), то диапазон навесок сдвигается вниз и шаг на БТС повторяется до обнаружения кучных навесок.

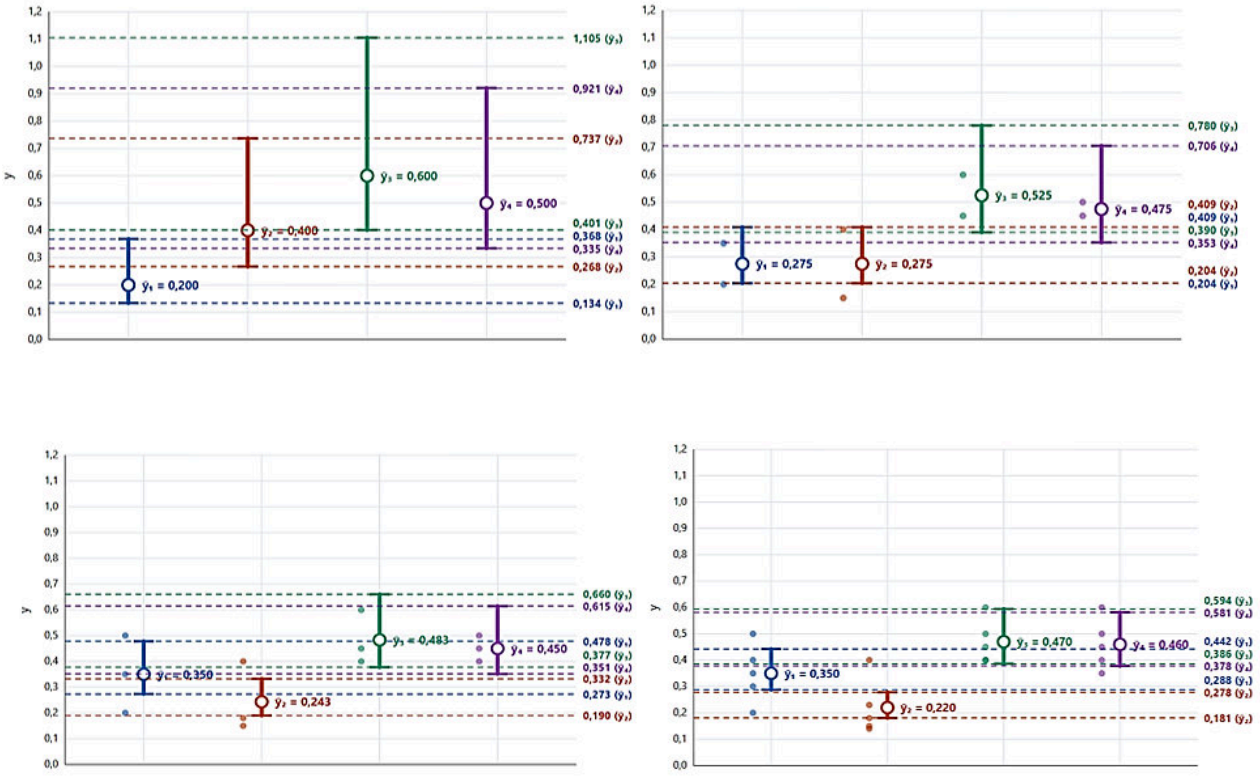


Рисунок 7. Средние значения и доверительные интервалы кучности при навесках 36,7, 37, 37,3, 37,6 gr

Шаги по посадке. Для Игоря Жукова не важно, в каком месте ствола (в нарезах или в джампе) пуля покажет экстремальную кучность. Это место просто нужно найти, пройдя весь диапазон. Однако если по опыту надежно известны более узкие диапазоны, можно исследовать только их. В процессе настройки пули с шагом, как правило, 0,003″ с уменьшением длины патрона задвигаются в гильзу от БТС до нахождения кучной полки по посадке. Второй шаг по посадке делается с уменьшенной относительно БТС длиной патрона. В зависимости от результата или все навески остаются, или какие-то убираются. Если самая кучная навеска появилась на краю диапазона, его можно сдвинуть на шаг или добавить точку.

По мере того, как делаются следующие шаги по посадке, информация о кучности при разных навесках становится все более надежной. На следующем шаге по посадке добавим группы y_{12}=0,35, y_{22}=0,15, y_{32}=0,45, y_{42}=0,45 МОА, и доверительные интервалы сузятся (рис. 7б). Навески 36,7 и 37,0 на втором шаге сравнялись по кучности. Уже на этом шаге можно отбросить третью навеску, как не перспективную, а с ней и четвертую. Если бы продолжать тесты на всех четырех навесках до пяти шагов, на первое место вышла бы навеска 2, а навески 3 и 4 окончательно показали бы себя как не кучные (рис. 7в, г). В модели использованы следующие значения кучности на 5 шагах для четырех разных навесок 36,7, 37,0, 37,3, 37,6 gr: y_1=0,2, 0,35, 0,5, 0,4, 0,3; y_2=0,4, 0,15, 0,18, 0,23, 0,14; y_3=0,6, 0,45, 0,4, 0,4,

0,5; y_4=0,5, 0,45, 0,4, 0,35, 0,6. Коэффициенты вариации для всех четырех случаев приняты равными 0,37. Даже по графикам рис. 7б уже возникает уверенность, что самыми кучными являются навески 36,7 и 37,0 gr, а после третьего шага можно уже оставлять и одну навеску 37,0 gr. Поэтому опытный настройщик по нашим данным отбросит лишние навески уже после первого или второго шага.

Шаги по посадке делаются до появления широкой кучной полки. Если кучная полка недостаточно широкая, меньше трех шагов, или сама кучность ниже ожидаемой, тесты продолжаются до появления широкой кучной полки. Чаще всего к этому моменту остается одна или две навески.

В шагах по посадке есть одна важная тонкость. Самая кучная навеска, найденная на БТС, не обязана оставаться самой кучной на других посадках. Более того, по теории она вполне может сместиться, и дело не только в изменчивости статистически малых групп. Комбинация «навеска-посадка» не обязана на разных посадках включать одну и ту же навеску по физике процесса.

Как только число навесок сузилось до одной-двух, основной задачей настройки становится поиск широкой кучной полки по посадке. Предположим, что дальше мы ищем кучную полку по посадке на одной навеске 37 gr. Под кучной полкой понимаем три и более подряд кучных посадок. В отличие от навески, у которой кучность часто изменяется плавно, с изменением посадки кучность может измениться резко, буквально за один шаг 0,003″ (рис. 8), и довольно сильно.

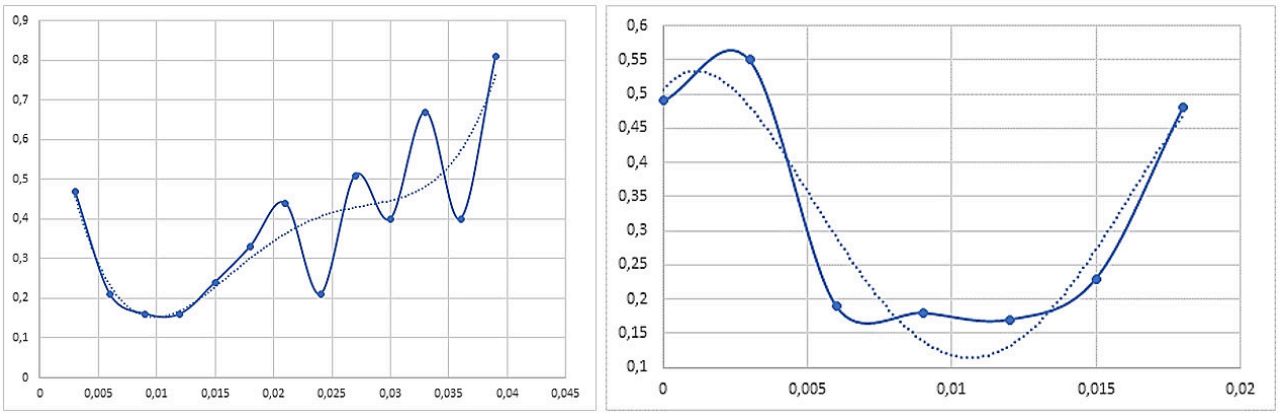


Рисунок 8. Зависимость размера групп ES_3 от глубины посадки пули при навеске 37 gr для двух повторов теста

На это хотелось бы обратить внимание тех стрелков, которые слишком большой акцент делают на настройке кучности по навеске и не уделяют достаточного внимания настройке по посадке. Здесь уместно еще раз привести мысль Игоря Жукова о том, что навеска в большей степени отвечает за скорость пули, а посадка за финальную настройку кучности.

На рис. 8 представлены реальные зависимости размера групп от глубины посадки пули при навеске 37 gr для винтовки 6.5x47 Lapua. Это повтор теста. На первом и втором шагах по 0,003″ размер групп на этой навеске большой, но с третьего шага он резко уменьшается и держится 4 шага, после чего снова растет. В примере на навеске, которая проявила себя как лучшая на первом шаге, кучность на этой посадке хуже. Эти графики одновременно

показывают, почему нельзя работать на произвольной посадке, почему нужно начинать с нескольких посадок, и почему финальная настройка винтовки должна проводиться по глубине посадки пули.

Оценим, какова достоверность того, что найденные минимальные размеры групп в методе Игоря Жукова можно считать кучной полкой. По графикам рис. 8 «на глаз» это и так видно, но поскольку мы имеем дело с ограниченными выборками, лучше иметь математическое доказательство. Проведем дисперсионный анализ и определим доверительные интервалы для двух пар групп, представленных на рис. 9. Одна группа в каждой паре содержит размеры внутри кучной полки, а вторая за ее пределами. Значения первой пары: 0,49, 0,55, 0,48 MOA за кучной полкой и 0,19, 0,18, 0,17, 0,23 MOA на кучной полке. Для второй пары: 0,47, 0,33, 0,44, и 0,21, 0,16, 0,16, 0,24 MOA. Для двух выборок дисперсионный анализ равносилен критерию Стьюдента: для первой пары t = 13,08, и t^2 = F. Он показал существенные различия групп на кучной полке и вне ее (рис. 9).

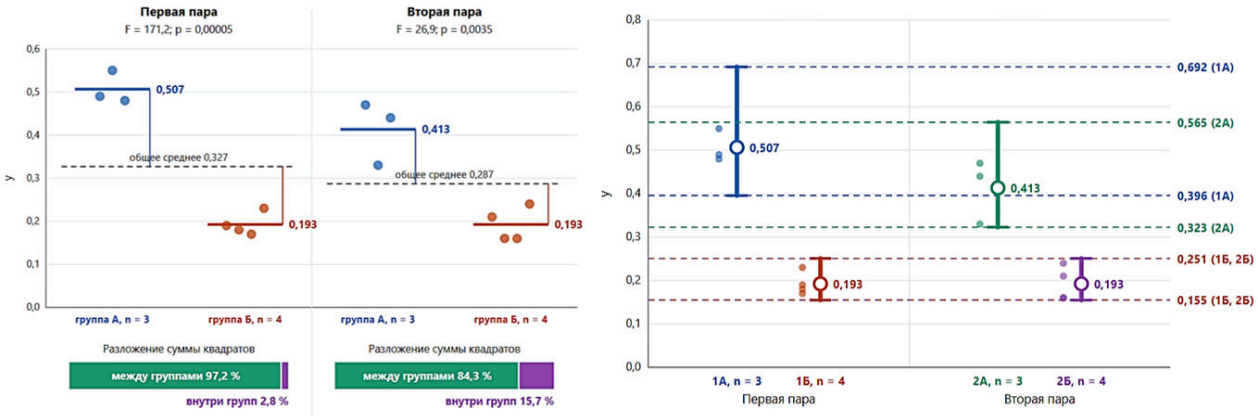


Рисунок 9. а-дисперсионный анализ двух пар групп; б-доверительные интервалы для двух пар групп

Средние первых двух выборок различаются статистически значимо: F = 171,2 при критическом 6,61 (уровень 0,05), p ≈ 0,00005. Критические значения F(1; 5): 6,61 для уровня 0,05 и 16,26 для уровня 0,01. Расчётное 171,2 превышает оба с большим запасом. Средние вторых двух групп тоже различаются статистически значимо: F = 26,9 при критическом 6,61 (уровень 0,05), p = 0,0035. Критические значения F(1; 5): 6,61 для уровня 0,05 и 16,26 для уровня 0,01. Расчётное 26,9 превышает оба. Доля объяснённой изменчивости: у первых групп 97,2 % общего разброса приходится на различие между выборками и только 2,8 % на разброс внутри них. Разность средних: 0,314; 95 %-й доверительный интервал от 0,252 до 0,376. Доля объяснённой изменчивости для второй группы: 84,3 % общего разброса приходится на различие между группами, 15,7 % на разброс внутри них. Разность средних: 0,221; 95 %-й доверительный интервал от 0,111 до 0,330. Отношение дисперсий для первой пары 2,07 при критическом F(2; 3) = 16,04, p = 0,54. Различие дисперсий не значимо, условие применимости анализа не нарушено. Критерий Уэлча, не требующий равных дисперсий, даёт тот же результат: t = 12,3, p = 0,0006. Отношение дисперсий для второй пары 3,49 при критическом F(2; 3) = 16,04, p = 0,33. Различие дисперсий также не значимо. Критерий Уэлча [15] даёт t = 4,71, p = 0,020: различие значимо на уровне 0,05. Доверительные интервалы внутри обеих пар групп не пересекаются. Интервалы рассчитаны по правилу: среднее группы умножается

на стандартный интервал для соответствующего числа опытов [14]. В первой паре зазор от 0,251 до 0,396, во второй — от 0,251 до 0,323. Это согласуется с дисперсионным анализом: различие значимо в обеих парах. Использованные для анализа математические инструменты можно применять в практических тестах для доказательства кучной полки. Для практики можно дать рекомендацию, что, если размер групп на кучной полке примерно в 2 раза меньше размера групп за ее пределами, а количество кучных групп не менее трех, кучная полка найдена с высокой достоверностью. Необязательный шаг, но при ощущении, что кучность можно еще немного повысить, – проверка кучности на найденной кучной посадке при небольшом смещении навески.

Размер групп ES_n выбран в качестве критерия кучности не случайно, в него тоже заложена логика. Одна случайная пробоина может сильно раздвинуть группу и указать на потенциально кучную точку как на некучную. Но, с другой стороны, отрыв при настройке может являться сигналом, что что-то сделано неправильно, и нужно перестрелять эту группу.

Выбор точки настройки

За точку настройки по глубине посадки пули выбирается самый длинный патрон на кучной полке. Это дает возможность долго удерживать кучность по мере сгорания нарезов пульного входа.

Проверка экстремальной кучности

Следующий, заключительный шаг – проверка кучности в выбранной точке (в нашем примере 37 gr; 0,006″). Проверка ведется двумя способами: или оценивается размер всех групп на кучной полке, или отстреливаются 2–3 группы по 5 выстрелов. В нашем примере на двух кучных полках мы имеем восемь групп с размерами 0,19, 0,18, 0,17, 0,23, 0,21, 0,16, 0,16, 0,24 MOA. Среднее равно 0,19 MOA; 80 %-й доверительный интервал для среднего — ES_3 = (0,16–0,23) MOA [8, 14, 16]. Обратим внимание на то, что фактический разброс этих восьми чисел оказался заметно меньше полученного для коэффициента вариации 0,37: выборочное стандартное отклонение 0,031, и коэффициент вариации для этой группы равен 0,16 против теоретического 0,37. Поэтому фактический интервал по самой выборке (по Стьюденту, 7 степеней свободы), составляет (0,18–0,21) MOA, что вполне приемлемо для практики. Однако нужно отметить, что значение 0,16 могло оказаться случайным. Но могло быть и так, что в зоне кучной полки распределение другое, и исследование вопроса закона распределения пробоин в точках настройки нужно продолжить.

Финальную оценку кучности удобно проводить группами по 5 выстрелов, кроме того, это уже сложившийся стандарт в оценке кучности. Поскольку в данном примере набралось восемь групп по 3 выстрела, отстрел еще двух групп по 5 выстрелов можно считать излишним, кучность подтвержденной, а тест законченным. Так как известно соотношение $ES_5 = 1{,}27 \cdot ES_3$, то при пересчете кучности ES_3 на ES_5 получим ожидаемое значение среднего ES_5=0,24 MOA, а доверительный интервал ES_5 = (0,20–0,29) MOA.

Представленных шагов достаточно для настройки спортивной или охотничьей винтовки и получения контрольных значений кучности. Остается выяснить, что в понимании Игоря Жукова значит получаемая таким методом настройка для других дистанций. Кучность

винтовки на любой дистанции складывается из разброса начального направления вылета группы пуль из ствола и из разброса отклонений пуль в полете, обусловленного разбросом начальной скорости и БК, а также отклонением метеоусловий (главным образом, порывами и изменением направления ветра, миражом) между выстрелами. При настройке винтовки на дистанции 100 метров в закрытом тире в полностью контролируемых условиях Игорь Жуков добивается именно минимального разброса направления вылета пуль [2], при минимальном влиянии на этот разброс комплекса для стрельбы и самого стрелка, и называет это технической кучностью винтовки.

Перенос результатов настройки с дистанции 100 м на любые другие дистанции предполагает независимость найденной точки настройки от дистанции. В данном случае под настройкой понимается минимальный угол рассеивания направления вылета пуль из ствола, который практически не меняется с дистанцией. Настройка, конечно, подразумевает минимизацию разброса скорости и баллистического коэффициента, а также учет ветра и других внешних факторов как дополнительные меры по обеспечению экстремальной кучности на дальних дистанциях.

В стрельбе на любые дальности техническая кучность винтовки с минимальными разбросами скорости и баллистического коэффициента пули играет ведущую роль в вероятности попадания в цель [1, 2], а стрелок, имеющий настроенную винтовку, претендует на самые высокие места в соревнованиях или дальний меткий выстрел на охоте.

Пример настройки охотничьей винтовки в калибре .223 Remington по методу Игоря Жукова

Проверку метода проводили двумя способами: сравнением настроенной и не настроенной той же самой винтовки, и множественным сравнением результатов настройки с другими винтовками. Как пример проверки метода рассмотрим настройку охотничьей винтовки в калибре .223 Remington. Полученный средний размер групп из 3 выстрелов 0,14 MOA – это скорее всего, не только ее предел, но и предел кучности винтовок этого калибра и класса. Мишени с процессом и итоговыми результатами настройки приведены на рис. 10. Видно, как Игорь Жуков прошел три посадки (1,708–1,714″) с четырьмя навесками (24,2–24,8) gr, поскольку не хотел отдать предпочтения ни одной из них, потом отбросил одну навеску 24,8 gr и прошел еще две посадки (1,717–1,720″) с тремя навесками (24,2–24,6) gr, потом прошел еще 6 посадок (1,723–1,738″) на двух навесках (24,2–24,4) gr, потом прошел ещё 7 посадок (1,741–1,759″) на одной навеске 24,2 gr. В диапазоне посадок 1,729–1,738″ сформировалась широкая полка: четыре последовательные посадки подряд дали кучность 0,13–0,19 MOA. Для заводской винтовки результат выдающийся. Навеска 24 gr не исследована потому, что кучность уже получилась предельной для охотничьей винтовки, и опыт подсказал, что выше достичь кучность будет сложно. Широкая кучная полка ценна тем, что позволяет дольше не думать о разгаре нарезов: выбираем верхнюю точку (в данном случае 1,7290″ по голове матрицы) — и работаем. Можно видеть, что семь посадок на навеске 24,2 gr были уже лишние и выстрелы сделаны из любознательности.

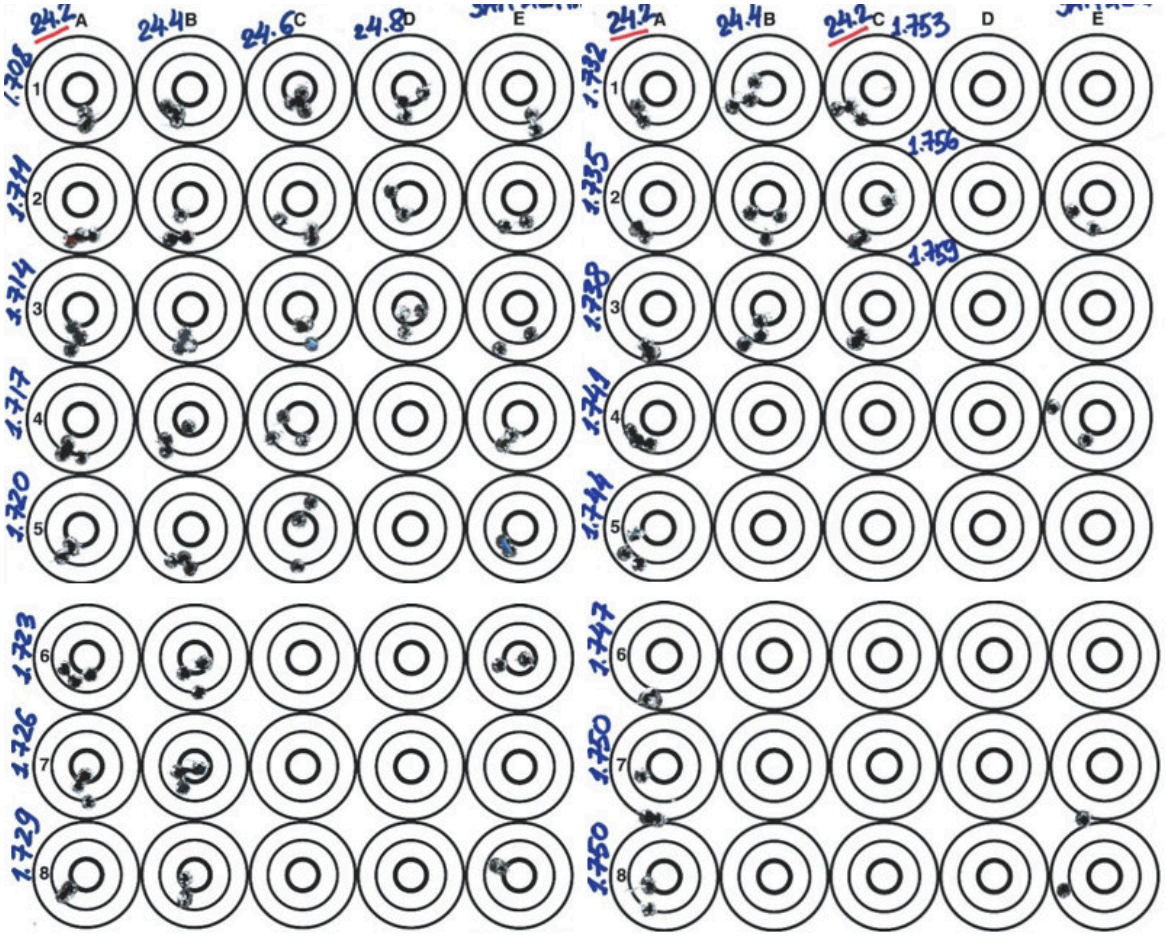


Рисунок 10. Настроечные мишени для винтовки в калибре .223 Rem

После анализа всей мишени выбраны точки настройки: навеска — 24,2 gr; посадка — 1,7290″. Если в настройке есть полка, всегда выбирают верхнюю точку — это продлевает настрел по мере выгорания нарезов.

Для проверки кучности в точке настройки было сделано восемь зачётных выстрелов (рис. 11). Один выстрел ушёл в отрыв. Без него размер группы составил 0,14 MOA, с ним — 0,28 MOA. Учитывая, что при одной и той же кучности винтовки размеры групп из 8 выстрелов в 1,49 раз больше размера групп из 3 выстрелов, размер приведенной к 3 выстрелам группы составил 0,098 MOA без отрыва и 0,188 с отрывом. Нужно отметить, что большие группы объективно лучше оценивать не размером групп, а средним радиусом, отмечая отрывы отдельно. В данном случае группу сильно раздвинул всего один выстрел. Как бы ни оценивать эту зачетную группу, она соответствует размеру групп на кучной полке, и значит, настройка подтверждена. Всего при настройке выполнено 38 зачётных групп и 19 загрязняющих выстрелов, итого 133 выстрела (значительно больше обычного, но это исследовательская настройка, и по мишени видно, что можно было уменьшить число выстрелов на половину).

Рисунок 11. Зачетные 8 выстрелов для проверки кучности в точке настройки

Итог настройки: кучность групп на кучной полке составила 0,11; 0,12; 0,14; 0,19 MOA. Средняя — 0,14 MOA. Из 38 групп 10 показали кучность лучше 0,2 MOA (одна — 0,09 MOA, шесть — не хуже 0,15 MOA); ещё 10 групп — не хуже 0,3 MOA; 15 групп — не хуже 0,4 MOA. Худшие группы — 0,45, 0,63 и 0,77 MOA. Если винтовка не была бы настроена, её кучность была бы намного хуже. Среднее по трем худшим группам 0,62 MOA, среднее по четырем лучшим группам — 0,14 MOA, то есть разница почти в пять раз.

Заключение

Проведённый анализ позволяет сформулировать следующие основные выводы. Настройка спортивных и охотничьих винтовок на экстремальную кучность в методе Игоря Жукова основана на конкретных и статистически проверяемых цифрах. Метод настройки представляет собой не отдельный тест, а часть системы обеспечения предельно достижимой точности этих видов оружия. Её результат формируется совокупностью взаимосвязанных операций с доказуемым результатом: подготовкой винтовки и гильз, определением безопасной начальной длины патрона, установлением рабочего диапазона навесок, отбором перспективных вариантов, пошаговой настройкой глубины посадки пули и окончательной проверкой найденной точки.

Метод дает достаточный для подтверждения решений объем статистики. Он показывает, что одна группа из трёх выстрелов пригодна для предварительного отбора, но недостаточна для окончательной оценки кучности. На первом шаге доверительные интервалы отдельных групп из 3 выстрелов широко перекрываются, поэтому формально выбрать одну лучшую навеску на этом шаге обычно не получается. Однако смысл метода как раз состоит в том, что каждый следующий шаг по навеске и посадке добавляет новые данные, таким образом сужает неопределённость и позволяет последовательно исключать явно неперспективные варианты.

Главным объектом финальной настройки является широкая кучная полка по глубине посадки пули. Несколько последовательных посадок с устойчиво малыми размерами групп свидетельствуют о зоне низкой чувствительности результата к небольшим изменениям

параметров патрона и условий выстрела. Анализ экспериментальных данных позволил сформулировать статистические признаки кучной полки: различия между размерами групп внутри полки и за её пределами должны быть значимыми как по дисперсионному анализу, так и по критериям Стьюдента и Уэлча, а доверительные интервалы сравниваемых выборок не должны пересекаться. Для исследованного примера уменьшение размера групп на кучной полке примерно в 2 раза относительно соседних не кучных областей являлось убедительным признаком найденной кучной полки. Этот коэффициент следует рассматривать как практический ориентир при настройке винтовок на экстремальную кучность.

Финальный результат настройки следует оценивать по совокупности групп, желательно из 5 выстрелов. Для этого можно использовать все группы, полученные внутри подтверждённой кучной полки, либо выполнить контрольный отстрел двумя или тремя группами по пять выстрелов. Вместе с измеренным средним необходимо приводить доверительный интервал, поскольку одна малая группа не характеризует устойчивую кучность комплекса. Две группы по 5 выстрелов обеспечивают точность оценки среднего около 25 %, однако к ним можно добавить группы, полученные на кучной полке, и тогда точность оценки возрастет.

Анализ метода Игоря Жукова показывает, что для поиска экстремальной кучности нужно сделать не менее определенного числа выстрелов, примерно от 60 до 100, при большом опыте 40–60. На первый взгляд может показаться много, но их сокращение приводит к неполной настройке спортивного или охотничьего оружия. Известны заявления о других более экономичных методах, например, о лестничном тесте Крейтона Одетта. Но на практике оказывается, что они служат лишь как предварительные способы поиска области-кандидата, а для финальной настройки в сумме требовалось не меньше выстрелов.

Таким образом, метод Игоря Жукова имеет физическое, статистическое и экономическое обоснование. Его сила заключается в правильно организованном последовательном накоплении информации, при котором статистическая неопределённость постепенно уменьшается, неперспективные варианты исключаются, а окончательное решение принимается по широкой кучной полке. Метод Игоря Жукова превращает настройку винтовки в управляемый процесс получения доказуемого и воспроизводимого результата. Итогом является возможность настроек спортивных и охотничьих винтовок на максимально достижимую для них кучность.

Список литературы

1. Богословский В.Н., Жуков И.Г. Настройка спортивных винтовок на экстремальную кучность. Новый аналитический обзор методов // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. – 2025. – № 8 (137). – DOI: 10.32743/UniTech.2025.137.8.20728. URL: https://7universum.com (дата обращения: 18.10.2026).
2. Жуков И.Г. Идеальный выстрел – это просто! М.: Издательство книг.ком. – 2023. – 416 с.
3. Zant C. Creighton Audette’s Ladder Test [Электронный ресурс]. // Precision Rifle Blog. – 2012. (дата обращения: 18.10.2026).precisionrifleblog.com/2012

4. Constantine R. Incremental Load Development Method [Электронный ресурс]. // Precision Shooting Annual. Bayfield, CO: Precision Shooting, Inc. – 1997. URL: http://precisionrifleblog.com/wp-content/uploads/2012/07/ (дата обращения: 18.10.2026).2012/07/incremental
5. Brief Overview of Creighton Audette’s 20 Round String Load Development Method [Электронный ресурс]. // Precision Shooting Reloading Guide. – 1998. URL: http://precisionrifleblog.com/wp-content/uploads/2012/07/excerpt-on-creighton-audettes-20-round-string-load-development.pdf (дата обращения: 18.10.2026).
6. Moritz R. An Incremental Load Development Method [Электронный ресурс]. // Black Powder Cartridge. URL: https://www.blackpowdercartridge.com/an-incremental-load-development-method (дата обращения: 18.10.2026).
7. Affleck D. ILDM Load Testing (aka “Ladder Test”) [Электронный ресурс]. // Coyote Stuff. URL: https://coyotestuff.com/articles/ildm-load-testing-aka-ladder-test/ (дата обращения: 18.10.2026).
8. The Ladder Test for Rifle Load Development [Электронный ресурс]. // Sporting Shooter. – 2009. URL: https://sportingshooter.com.au/hunting-skills/the-ladder-test-for-rifle-load-development/ (дата обращения: 18.10.2026).
9. Newberry D. Optimal Charge Weight Load Development [Электронный ресурс]. URL: http://optimalchargeweight.embarqspace.com/ (дата обращения: 18.10.2026).
10. Kotz S., Lumelskii Y., Pensky M. The Stress–Strength Model and Its Generalizations: Theory and Applications. – Singapore: World Scientific, 2003. – 272 P.ISBN 978-981-256-451-1.
11. NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods. 7.2.6.3. Tolerance Intervals for a Normal Distribution [Электронный ресурс] / National Institute of Standards and Technology. / handbook/prc/section2/prc263.htm. URL: https://www (дата обращения: 18.10.2026).
12. Commission Internationale Permanente pour l’Épreuve des Armes à Feu Portatives. 6,5 × 47 Lapua: Tables of Dimensions of Cartridges and Chambers [Электронный ресурс]. Rev. 14.05. – 2020. URL: https://bobp.cip-bobp.org/uploads/tdcc/tab-i/6-5-x-47-lapua-en.pdf (дата обращения: 18.10.2026).
13. Dixon W.J., Mood A.M. A Method for Obtaining and Analyzing Sensitivity Data // Journal of the American Statistical Association. – 1948. – Т. 43, № 241. – P. 109–126.10.1080/01621459.1948.10483254.
14. Meeker W.Q., Hahn G.J., Escobar L.A. Statistical Intervals: A Guide for Practitioners and Researchers. 2nd ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2017. 592 P. DOI: 10.1002/9781118594841.
15. Montgomery D.C. Design and Analysis of Experiments. 10th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2019. 688 P.
16. Kroese D.P., Taimre T., Botev Z.I. Handbook of Monte Carlo Methods. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2011. 772 P. DOI: 10.1002/9781118014967.

References

1. Bogoslovsky V.N., Zhukov I.G. Tuning Sporting Rifles for Extreme Precision. A New Analytical Review of Methods // Universum: Technical Sciences: Electronic Scientific Journal. – 2025. – No. 8 (137). – DOI: 10.32743/UniTech.2025.137.8.20728 [Электронный ресурс]. – URL: https://7universum.com.
2. /ru/tech/archive/item/20728 (Available at: 18 October 2026).
3. Zhukov I.G. The Perfect Shot Is Easy! Moscow: Izdatelstvo Knig.kom, 2023. 416 P.
4. Zant C. Creighton Audette's Ladder Test [Electronic resource]. // Precision Rifle Blog. – 2026.precisionrifleblog.com/2012
5. Constantine R. Incremental Load Development Method [Электронный ресурс]. // Precision Shooting Annual. Bayfield, CO: Precision Shooting, Inc. – 2026. – URL: http://precisionrifleblog.com/wp-content/uploads/2012/07.2012/07/incremental
6. Brief Overview of Creighton Audette's 20 Round String Load Development Method [Electronic resource]. // Precision Shooting Reloading Guide. – 2026. – URL: http://precisionrifleblog.com/wp-content/uploads/2012/07/excerpt-on-creighton-audettes-20-round-string-load-development.pdf.
7. Moritz R. An Incremental Load Development Method [Electronic resource]. // Black Powder Cartridge. (Available at: 18.10.2026). – 2026. – URL: https://www.blackpowdercartridge.com/an-incremental-load-development-method.
8. Affleck D. ILDM Load Testing (aka "Ladder Test") [Electronic resource]. // Coyote Stuff. (Available at: 18.10.2026). – 2026. – URL: https://coyotestuff.com/articles/ildm-load-testing-aka-ladder-test/.
9. The Ladder Test for Rifle Load Development [Electronic resource]. // Sporting Shooter. – 2026. – URL: https://sportingshooter.com.au/hunting-skills/the-ladder-test-for-rifle-load-development/.
10. Newberry D. Optimal Charge Weight Load Development [Electronic resource]. (Available at: 18.10.2026). – URL: http://optimalchargeweight.embarqspace.com/.
11. Kotz S., Lumelskii Y., Pensky M. The Stress–Strength Model and Its Generalizations: Theory and Applications. – Singapore: World Scientific, 2003. – 272 P.ISBN 978-981-256-451-1.
12. NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods. 7.2.6.3. Tolerance Intervals for a Normal Distribution [Electronic resource] / National Institute of Standards and Technology. / handbook/prc/section2/prc263.htm (Available at: 18.10.2026). – URL: https://www.itl.nist.gov/div898
13. Commission Internationale Permanente pour l'Épreuve des Armes à Feu Portatives. 6,5 × 47 Lapua: Tables of Dimensions of Cartridges and Chambers [Electronic resource]. Rev. 14.05.2020. (Available at: 18.10.2026). – URL: https://bobp.cip-bobp.org/uploads/tdcc/tab-i/6-5-x-47-lapua-en.pdf.
14. Dixon W.J., Mood A.M. A Method for Obtaining and Analyzing Sensitivity Data // Journal of the American Statistical Association. – 1948. – Vol. 43, No. 241. – P. 109–126.10.1080/01621459.1948.10483254.

15. Meeker W.Q., Hahn G.J., Escobar L.A. Statistical Intervals: A Guide for Practitioners and Researchers. 2nd ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2017. 592 P. DOI: 10.1002/9781118594841.
16. Montgomery D.C. Design and Analysis of Experiments. 10th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons. – 2019. – 688 P.ISBN 978-1-119-49244-3.
17. Kroese D.P., Taimre T., Botev Z.I. Handbook of Monte Carlo Methods. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2011. 772 P. DOI: 10.1002/9781118014967.

Статья поступила в редакцию: 10.11.2026
Статья принята к публикации: 18.11.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 621.941.025.7

Обоснование методики исследования температурной зависимости внутренних напряжений второго рода в твердых сплавах группы ТТК

Наумов Никита Павлович
аспирант
Тюменский индустриальный университет
Российская Федерация, Тюменская область, г. Тюмень
E-mail: repackrussian@gmail.com

Substantiation of a methodology for studying the temperature dependence of second-order internal stresses in TTK-group hard alloys

Naumov Nikita Pavlovich
postgraduate
Tyumen Industrial University
Russia, Tyumen

Аннотация

Цель работы — обоснование и разработка методики исследования внутренних напряжений второго рода в твердых сплавах группы ТТК (WC–TiC–TaC–Co) для последующего повышения работоспособности сменных многогранных пластин (СМП) путем их снятия предварительным нагревом. Методология. Проведен аналитический обзор литературы по структуре сплавов групп ВК, ТК и ТТК, природе термических микронапряжений, методам их снятия и способам определения температуры максимальной работоспособности инструментальных твердых сплавов; выполнена постановка задачи переноса метода предварительного нагрева, апробированного для сплавов групп ВК и ТК, на трехфазные сплавы, содержащие комплексный твердый раствор (Ti,W,Ta)C. Результаты. Показано, что температурные зависимости внутренних напряжений второго рода для сплавов группы ТТК в литературе отсутствуют, а опубликованные значения температуры максимальной работоспособности сплавов группы ТК, полученные разными методами, существенно различаются (700–1140 °C), что не позволяет переносить параметры метода на сплавы ТТК без отдельного исследования. Разработана методика исследования, включающая определение термомеханических характеристик фаз, расчет напряжений по математической модели «сферическое включение — неограниченная среда» и их экспериментальную проверку рентгенографическим методом в диапазоне 20–900 °C, а также план последующих стойкостных испытаний. Выводы. Научная новизна работы состоит в выявленном пробеле —

Библиографическое описание: Наумов Н.П. Обоснование методики исследования температурной зависимости внутренних напряжений второго рода в твердых сплавах группы ТТК // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23762

отсутствии температурных зависимостей внутренних напряжений второго рода для сплавов группы ТТК — и в обоснованной постановке задачи их определения. Прогнозируемый практический эффект (рост стойкости инструмента на 30–50 % и сокращение отказов по сколам и поломкам в 2–3 раза) сформулирован по аналогии со сплавами групп ВК и ТК и подлежит экспериментальному подтверждению.

Abstract

The aim of the work is to substantiate and develop a research methodology for second-order internal stresses in TTK-group hard alloys (WC–TiC–TaC–Co), so that these stresses can be relieved by preheating to improve the performance of indexable cutting inserts. Methodology. A literature review covers the structure of VK, TK and TTK alloys, the nature of thermal microstresses, methods of their relieving and techniques for determining the temperature of maximum performance of tool hard alloys; the problem of transferring the preheating method, proven for VK and TK alloys, to three-phase alloys with the complex solid solution (Ti,W,Ta)C is formulated. Results. No temperature dependencies of second-order internal stresses for TTK-group alloys are available in the literature, while published maximum-performance temperatures for TK-group alloys obtained by different methods differ significantly (700–1140 °C), which prevents direct transfer of the method parameters to TTK alloys without a separate study. A research methodology is developed, comprising determination of thermomechanical phase characteristics, stress calculation with the «spherical inclusion — infinite medium» model, experimental verification by X-ray diffraction at 20–900 °C, and a plan for subsequent tool-life tests. Conclusions. The scientific novelty lies in the identified gap — the absence of temperature dependencies of second-order internal stresses for TTK-group alloys — and in the substantiated statement of the problem of their determination. The predicted practical effect (30–50 % longer tool life and 2–3 times fewer chipping and breakage failures) is derived by analogy with VK and TK alloys and requires experimental confirmation.

Ключевые слова: твердые сплавы, группа ТТК, сменные многогранные пластины, внутренние напряжения второго рода, предварительный нагрев, температура максимальной работоспособности, методика исследования.

Keywords: hard alloys, TTK group, indexable cutting inserts, second-order internal stresses, preheating, temperature of maximum performance, research methodology.

Введение

Современное металлообрабатывающее производство активно применяет сборные режущие инструменты, оснащенные сменными многогранными пластинами (СМП) из инструментальных твердых сплавов (ИТС), которые, в отличие от инструментов с напайной пластиной, обеспечили рост стойкости режущих пластин на 25–30 %, двукратное сокращение расхода твердого сплава и повышение производительности обработки на 20–25 % [11]. Вместе с тем производственная статистика показывает, что 70–75 % отказов инструментов с СМП связано с разрушением пластин — выкрашиванием, скалыванием и поломкой [11].

Снижение частоты таких отказов является эффективным способом повышения экономичности отечественного производства и ресурса сборных режущих инструментов при обработке труднообрабатываемых материалов.

Аналитический обзор

1. Твердые сплавы групп ВК, ТК и ТТК. Инструментальные твердые сплавы представляют собой композиционные материалы, состоящие из карбидных зерен и металлической (кобальтовой) связки [9, 14]. Однокарбидные сплавы группы ВК (WC–Co) отличаются высокой прочностью и вязкостью и применяются преимущественно при обработке чугунов и титановых сплавов. Двухкарбидные сплавы группы ТК (WC–TiC–Co), карбидной фазой которых служит твердый раствор (Ti,W)C, обладают более высокими твердостью, теплостойкостью (около 900 °C) и стойкостью против окисления и применяются при обработке сталей, дающих сливную стружку. Сплавы группы ТТК (WC–TiC–TaC–Co) имеют трехфазную структуру, в которой наряду со свободными зернами WC и кобальтовой связкой присутствует комплексный твердый раствор (Ti,W,Ta)C. По ГОСТ 3882 – 74 к этой группе относятся марки ТТ7К12 (81 % WC, 4 % TiC, 3 % TaC, 12 % Co), ТТ8К6 (84 % WC, 8 % TiC, 2 % TaC, 6 % Co) и ТТ10К8-Б (82 % WC, 3 % TiC, 7 % TaC, 8 % Co). Легирование карбидами тантала (и ниобия) повышает сопротивление сплавов пластической деформации и их прочность при изгибе по сравнению со сплавами группы ТК, сохраняет режущую способность при температурах 1000–1050 °C, что делает сплавы ТТК основным инструментальным материалом при обработке труднообрабатываемых сталей и сплавов, в том числе в условиях прерывистого резания [1]. Обзор работ о влиянии добавок TaC на свойства твердых сплавов показывает, что введение 1–3 % TaC повышает механические свойства сплавов в интервале 400–800 °C, а 1 % TaC увеличивает высокотемпературную (900–1000 °C) прочность сплава ВК10 на 10–20 %; при этом механизмы влияния карбида тантала до конца не раскрыты и по сей день [10]. Современные представления о микроструктуре спеченных карбидов, включая формирование твердых растворов (Ti,W,Ta)C, систематизированы в работе [14].

2. Внутренние напряжения второго рода в твердых сплавах. По классификации, предложенной Н.Н. Давиденковым, остаточные напряжения подразделяются на три рода; напряжения второго рода уравновешиваются в объемах отдельных зерен и проявляются на рентгенограммах в виде уширения интерференционных линий [7]. Коэффициент термического линейного расширения кобальта существенно превышает коэффициенты расширения карбидных фаз, поэтому при охлаждении сплава ниже температур спекания между фазами возникают термические (межфазовые) микронапряжения: в карбидной фазе — напряжения сжатия, в кобальтовой связке — напряжения растяжения, достигающие, по различным данным, 500–2000 МПа [12, 16]. Измерения методом нейтронной дифракции подтверждают сжимающие напряжения порядка 500 МПа в фазе WC и растягивающие напряжения до 2 ГПа в кобальтовой связке [16]. Современные исследования моделированием методом конечных элементов на реальной микроструктуре в сочетании с нейтронной дифракцией показали, что термические остаточные напряжения в сплавах WC–Co накапливаются при охлаждении после спекания, результаты расчета согласуются с данными нейтронной дифракции, а распределение напряжений в карбидной фазе неоднородно

и зависит от направления [13]. Поскольку в настоящей работе материалы фаз приняты упругими, расчет по модели «сферическое включение — неограниченная среда» дает оценку напряжений сверху; учет пластического течения связки составляет следующий этап исследования. Применение синхротронной рентгеновской дифракции непосредственно в процессе высокотемпературной (1000 °C) деформации позволило проследить перераспределение нагрузки между карбидной фазой и связкой, что открывает возможность прямого наблюдения изменения напряжений в каждой из фаз при нагреве [17]. При комнатной температуре уровень внутренних напряжений второго рода максимален и приближается к пределу прочности связки, что является причиной хрупкого разрушения СМП в начальный период резания, в момент врезания [11].

3. Методы снятия внутренних напряжений второго рода. Снижение уровня термических микронапряжений достигается несколькими путями. Термическая обработка (отжиг) твердых сплавов позволяет перераспределить и частично снять внутренние напряжения, повышая эксплуатационные характеристики [5]. Разработан способ снятия напряжений второго рода предварительным регулируемым нагревом режущей пластины до начала процесса резания, защищенный патентом РФ и апробированный для сплавов групп ВК и ТК [1, 3, 11]. Альтернативным направлением является поверхностная модификация: обработка пластин из сплава ВК8 мощным ионным пучком наносекундной длительности повышает ресурс режущих пластин на 40 % при обработке жаропрочного сплава [4]. Метод предварительного нагрева привлекателен тем, что не требует изменения технологии изготовления пластин и реализуется непосредственно на металлообрабатывающем оборудовании.

4. Исследования внутренних напряжений в сплавах групп ВК и ТК. Для сплавов группы ВК (WC–Co) существование и величина внутренних напряжений второго рода подтверждены расчетным путем по математической модели, предложенной Е.В. Артамоновым [1], и экспериментально — рентгеноструктурным анализом сплавов ВК8, ВК10 и ВК15 в диапазоне температур от комнатной до 600 °C: напряжения уменьшаются линейно с ростом температуры и снимаются практически полностью при нагреве до 600 °C, соответствующей критической температуре перехода сплава из упругого в упругопластическое состояние [11]. Стойкостные испытания при точении стали 40Х СМП из ВК8 показали, что предварительный нагрев пластины до начала резания значительно сокращает вероятность поломки и увеличивает путь резания до разрушения на 40–50 % [11]. Для сплавов группы ТК (WC–TiC–Co) математическая модель была адаптирована с учетом иных упругих постоянных карбидной фазы (Ti,W)C; расчет и рентгенографические исследования сплавов Т30К4, Т15К6 и Т5К10 подтвердили линейный характер зависимости напряжений от температуры и их полное снятие при 700 °C [12]. Производственные испытания резцов и сборных фрез с пластинами Т15К6 продемонстрировали рост работоспособности инструмента на 30–40 % и сокращение числа отказов в 2–3 раза [12].

5. Температура максимальной работоспособности и разброс ее значений. Под температурой максимальной работоспособности (ТМР) понимается температура, соответствующая переходу твердого сплава из упругого (хрупкого) в упругопластическое (хрупкопластическое) состояние, при котором обеспечивается баланс твердости и прочности и, следовательно, максимальная стойкость инструмента [1, 2]. Разработан ряд способов ее определения: по точке перегиба зависимости ударной вязкости и логарифма твердости от

температуры, по коэффициенту интенсивности напряжений K1C, по минимальным значениям электрической проводимости [1, 2]. При этом опубликованные для сплавов группы ТК значения существенно различаются: температура снятия внутренних напряжений составляет 700 °C [12]; по минимуму электрической проводимости ТМР сплава Т5К10 определена в интервале 730–780 °C, сплава Т15К6 — 860–970 °C [2]; по данным стойкостных испытаний, приводимым в [12], максимум стойкости пластин Т5К10 достигается при 900–950 °C, а Т15К6 — при 1100–1140 °C. Указанный разброс показывает, что температура снятия внутренних напряжений второго рода и температура максимальной работоспособности не обязательно совпадают и зависят от метода определения и марки сплава, что требует отдельного исследования для каждой группы ИТС. Для сплавов группы ТТК температурные зависимости внутренних напряжений второго рода в литературе не представлены, температура их снятия экспериментально не подтверждена, а прямое использование констант сплавов групп ВК и ТК некорректно вследствие влияния карбида тантала на упругие и тепловые свойства твердого раствора (Ti,W,Ta)C [10].

Объект исследования — сменные многогранные пластины из твердых сплавов группы ТТК (ТТ7К12, ТТ8К6, ТТ10К8-Б).

Предмет исследования — внутренние напряжения второго рода в сплавах группы ТТК и их температурные зависимости.

Цель работы — обоснование и разработка методики определения температурной зависимости внутренних напряжений второго рода в твердых сплавах группы ТТК как основы последующего повышения работоспособности сборных режущих инструментов путем их снятия предварительным нагревом.

Задачи, решаемые в настоящей статье:

1) выполнить аналитический обзор работ по внутренним напряжениям второго рода в твердых сплавах, методам их снятия и способам определения температуры максимальной работоспособности ИТС;

2) обосновать постановку задачи переноса метода предварительного нагрева на сплавы группы ТТК;

3) разработать методику исследования, обеспечивающую воспроизводимость последующих расчетных и экспериментальных работ.

Задачи, решаемые в дальнейших исследованиях: определение термомеханических характеристик фаз сплавов ТТК; расчет внутренних напряжений второго рода по математической модели; экспериментальная проверка расчетных зависимостей рентгенографическим методом; производственные стойкостные испытания инструментов с предварительным нагревом пластин.

Научная новизна работы состоит в выявленном пробеле — отсутствии в литературе температурных зависимостей внутренних напряжений второго рода для трехфазных сплавов группы ТТК — и в обоснованной на его основе постановке задачи исследования, включающей адаптацию математической модели к сплавам с комплексным твердым раствором (Ti,W,Ta)C.

Материалы и методы

Методика исследования строится по схеме, апробированной для сплавов групп ВК и ТК [3, 11, 12], и включает пять этапов.

1. Материалы исследования. В качестве объектов исследования принимаются сменные многогранные пластины из твердых сплавов группы ТТК трех марок — ТТ7К12, ТТ8К6 и ТТ10К8-Б, охватывающие диапазон содержания карбида тантала от 2 до 7 % и кобальта от 6 до 12 % (ГОСТ 3882 – 74). Форма и размеры пластин — по ГОСТ 19052-80; для рентгенографических испытаний применяются образцы одинаковых формы и размеров, соответствующие габаритам камеры высокотемпературной приставки. Число образцов каждой марки — не менее трех. В качестве эталона для выделения физического уширения дифракционных линий используется образец того же сплава, прошедший отжиг.

2. Определение термомеханических характеристик фаз. Для комплексного твердого раствора (Ti,W,Ta)C и кобальтовой связки определяются модуль упругости E, коэффициент Пуассона ν и коэффициент термического линейного расширения α. Модуль упругости и коэффициент Пуассона предлагается определять интерферометрическим методом, разработанным для инструментальных твердых сплавов и обеспечивающим бесконтактное измерение упругих постоянных [8]; коэффициент теплового линейного расширения (далее КТЛР) — дилатометрическим методом. Введение карбида тантала изменяет упругие и тепловые свойства твердого раствора, поэтому прямое использование констант, принятых для сплавов групп ВК (WC: E = 731 ГПа, ν = 0,2) и ТК ((Ti,W)C: E = 350 ГПа, ν = 0,32; Co: E = 215 ГПа, ν = 0,32) [11, 12], некорректно. Учитывая значительный разброс справочных значений модуля упругости твердых сплавов, отмечаемый в литературе [12], расчет целесообразно вести по граничным (наибольшему и наименьшему) значениям с последующим усреднением результатов.

3. Расчет внутренних напряжений второго рода по математической модели. Расчет выполняется по модели «сферическое включение — неограниченная среда» [1, 3]: зерно карбидной фазы радиусом r0 рассматривается как сферическое включение в кобальтовой среде. В исходном состоянии при температуре спекания напряжения отсутствуют; при изменении температуры на величину ΔT из-за различия КТЛР среды и включения возникают напряжения. Температурное поле принимается однородным, материалы фаз — упругими, зависимость параметров от температуры в первом приближении не учитывается. В указанных условиях задача является центрально-симметричной и решается в сферической системе координат с началом в центре включения; по уравнениям деформаций, напряжений и равновесия определяются радиальная σr и тангенциальные σφ, σθ составляющие напряжений во включении и в среде [1, 3]. Расчет выполняется в диапазоне от температуры снятия напряжений до 0 °C с интервалом 100 °C по аналогии с [11, 12]. Температура снятия внутренних напряжений второго рода, соответствующая их нулевым значениям, принимается равной критической температуре перехода сплава из упругого в упругопластическое состояние [1, 3].

4. Экспериментальная проверка рентгенографическим методом. Исследование внутренних напряжений выполняется на автоматизированном дифрактометре (ДРОН-УМ1 с высокотемпературной приставкой УВД-2000 либо XRD 7000 Shimadzu Maxima

с высокотемпературной камерой), обеспечивающем съемку в диапазоне от комнатной температуры до 900 °C на воздухе [11, 12, 15]. Для определения микронапряжений используется отражение (200) кобальтовой связки. Образец помещается в печь приставки, нагревается до заданной температуры, выдерживается из расчета 1 мин на 1 мм толщины, после чего выполняется съемка дифрактограммы; испытания проводятся с шагом 100 °C в диапазоне 20–900 °C без смены образца [11, 12]. Внутренние напряжения оцениваются методом аппроксимации уширения дифракционных линий: по относительному изменению межплоскостного расстояния Δd/d, выделенному из физического уширения линии после исключения геометрических факторов и уширения от дисперсности блоков мозаики (по эталону), напряжения вычисляются по формуле [6]:

$$\sigma \approx (\Delta d/d) \cdot E, \quad (1)$$

где Δd/d — относительное изменение межплоскостного расстояния; E — модуль упругости. Учитывая разброс значений E, вычисление выполняется для граничных значений модуля упругости с последующим усреднением [12]. По результатам строится зависимость σ = f(θ), и по точке пересечения с нулевым уровнем определяется температура снятия внутренних напряжений — температура предварительного нагрева пластин [3, 11]. Расширение диапазона съемки до 900 °C (против 600 °C [11] и 700 °C [12]) принято с учетом повышенной красностойкости сплавов ТТК (1000–1050 °C) и опубликованных для сплавов ТК значений ТМР, превышающих 700 °C [2].

5. План последующих стойкостных испытаний. После определения температуры снятия напряжений планируются производственные испытания по стандартным методикам по схеме, примененной для сплава Т15К6 [12]: точение труднообрабатываемой стали (например, 20Х17Н2, диаметр заготовки 100 мм) сборным резцом с СМП из сплавов группы ТТК на токарном станке 16К20 с режимами S = 0,3 мм/об, t = 1 мм, V до 240 м/мин, с предварительным нагревом пластин и без него. Критерий затупления — радиальный износ hr = 50 мкм, измеряемый микроскопом МИР-2; температура пластины контролируется инфракрасным пирометром (KLEIBER KS740-LO, диапазон 600–1600 °C); оцениваются путь резания до затупления, интенсивность износа по задней поверхности и число отказов по сколам и поломкам [12].

Ожидаемые результаты

В соответствии с разработанной методикой ожидается получение следующих результатов. Ожидаемые результаты математического моделирования: расчетные температурные зависимости внутренних напряжений второго рода σ = f(θ) для сплавов ТТ7К12, ТТ8К6 и ТТ10К8-Б по модели «сферическое включение — неограниченная среда», вычисленные для граничных значений модуля упругости с последующим усреднением, а также оценка вклада карбидной фазы и кобальтовой связки в формирование напряженного состояния. Ожидаемые экспериментальные данные: серии дифрактограмм образцов в диапазоне 20–900 °C с шагом 100 °C, экспериментальные зависимости σ = f(θ)

и температура снятия напряжений, определенная по пересечению зависимости с нулевым уровнем, а также уточненные термомеханические характеристики фаз (Ti,W,Ta)C и кобальтовой связки для указанных марок сплава.

По аналогии со сплавами групп ВК и ТК предполагается линейное снижение внутренних напряжений второго рода с ростом температуры. Вблизи температуры снятия следует ожидать отклонения от линейности, связанного с пластическим течением кобальтовой связки, — поэтому расчет по упругой модели рассматривается как оценка сверху, а экспериментальная зависимость уточняет положение нуля. Температура их полного снятия для сплавов группы ТТК, вероятно, будет отличаться от установленных 600 и 700 °С вследствие иного соотношения коэффициентов термического расширения фаз при наличии карбида тантала в твердом растворе; с учетом красностойкости сплавов ТТК ожидаемое значение находится в диапазоне 700–900 °С и подлежит экспериментальному подтверждению. Полученные зависимости позволят также проверить соответствие температуры снятия напряжений температуре максимальной работоспособности сплавов ТТК, определяемой независимыми методами [2].

Снятие напряжений предварительным нагревом должно вывести режущую пластину из зоны хрупкого разрушения еще до врезания в обрабатываемый материал и исключить период приработки. Прогнозируемый практический эффект — повышение стойкости инструмента на 30–50 % и сокращение отказов по сколам и поломкам в 2–3 раза — сформулирован по результатам, полученным для сплавов групп ВК и ТК [5, 11, 12], и является ожидаемым результатом, требующим подтверждения производственными стойкостными испытаниями по пункту 5 методики. Перспективой работы является разработка технологических решений и устройств предварительного регулируемого нагрева СМП из сплавов группы ТТК по аналогии с реализованными для сплавов групп ВК и ТК [3, 12]. Результаты планируемых расчетных и экспериментальных исследований, а также производственных испытаний будут представлены в следующих публикациях.

Заключение

Выполнен аналитический обзор работ по внутренним напряжениям второго рода в инструментальных твердых сплавах и методам их снятия. Показано, что для сплавов групп ВК и ТК температурные зависимости напряжений установлены (полное снятие при 600 и 700 °С соответственно), а для сплавов группы ТТК такие зависимости в литературе отсутствуют; опубликованные значения температуры максимальной работоспособности сплавов группы ТК, полученные разными методами, различаются (700–1140 °С), что не позволяет переносить параметры метода предварительного нагрева на сплавы ТТК без отдельного исследования.

Научная новизна работы заключается в выявленном пробеле и обоснованной постановке задачи исследования: определение температурных зависимостей внутренних напряжений второго рода для трехфазных сплавов группы ТТК с адаптацией математической модели «сферическое включение — неограниченная среда» к сплавам, содержащим комплексный твердый раствор (Ti,W,Ta)C.

Разработана методика исследования, удовлетворяющая требованию воспроизводимости: определены материалы, методы оценки термомеханических характеристик фаз, порядок расчета напряжений, режимы рентгенографических испытаний

(дифрактометр, отражение (200) Co, диапазон 20–900 °C, шаг 100 °C) и план последующих стойкостных испытаний. Метод снятия внутренних напряжений второго рода предварительным нагревом является перспективным для всех твердых сплавов с кобальтовой связкой, однако его параметры должны подбираться отдельно для каждой группы и марки сплава; результаты планируемых исследований будут представлены в следующих работах.

Список литературы

1. Артамонов Е.В. Прочность и работоспособность сменных твердосплавных пластин сборных режущих инструментов. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2003. – 192 с.
2. Артамонов Е.В., Тверяков А.М., Штин А.С. Определение температуры максимальной работоспособности инструментальных твердых сплавов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2018. – Т. 20, № 3. – С. 47–57. – DOI: 10.17212/1994-6309-2018-20.3-47-57.
3. Артамонов Е.В., Чуйков С.С. Повышение работоспособности сменных твердосплавных пластин путем снятия внутренних напряжений // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. – 2010. – № 2 (90). – С. 42–44.
4. Бадамшин А.М., Ковивчак В.С., Полонянкин Д.А., Поворознюк С.Н. Модификация твердого сплава WC-Co при воздействии мощного ионного пучка наносекундной длительности // Ползуновский вестник. – 2024. – № 1. – С. 258–263. – DOI: 10.25712/ASTU.2072–8921.2024.01.033.
5. Богодухов С.И., Килов А.С., Шеин Е.А., Ясаков А.С., Хайбуллин Р.Р. Повышение эксплуатационных характеристик твердых сплавов термической обработкой // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2011. – № 5 (124). – С. 164–170.
6. Горбачева Т.Б. Рентгенография твердых сплавов. – М.: Металлургия, 1985. – 102 с.
7. Давиденков Н.Н. Некоторые проблемы механики материалов. – Л.: Лениздат, 1943. – 152 с.
8. Ефимович И.А., Артамонов Е.В., Чуйков Р.С. Интерферометрический метод исследования модуля упругости и коэффициента Пуассона инструментальных материалов // Нефть и газ Западной Сибири: материалы международной научно-технической конференции. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2003. – С. 33–34.
9. Лошак М.Г. Прочность и долговечность твердых сплавов. – Киев: Наукова думка, 1984. – 327 с.
10. Панов В.С., Зайцев А.А. Твердые сплавы WC–Co, легированные карбидом тантала: обзор // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2015. – № 2. – С. 44–48. – DOI: 10.17073/1997-308X-2015-2-44-48.
11. Чуйков Р.С. Повышение работоспособности сменных твердосплавных пластин путем снятия внутренних напряжений: дис. … канд. техн. наук: 05.03.01. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2004. – 154 с.

12. Чуйков С.С. Влияние внутренних напряжений в инструментальных твердых сплавах на работоспособность сборных инструментов: дис. … канд. техн. наук: 05.02.07. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2013. – 141 с.
13. Degeneve L., Mari D., Sousa Machado P.V.S., Jimenez-Piqué E. Distribution of the thermal residual stresses in the WC–Co microstructure by finite element method // Journal of the European Ceramic Society. – 2023. – T. 43, № 7. – P. 2818–2825. – DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2022.11.058.
14. García J., Collado Ciprés V., Blomqvist A., Kaplan B. Cemented carbide microstructures: a review // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2019. – T. 80. – P. 40–68. – DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2018.12.004.
15. Larsson C., Odén M. X-ray diffraction determination of residual stresses in functionally graded WC–Co composites // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2004. – T. 22. – P. 177–184. – DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2004.06.002.
16. Mari D., Krawitz A.D., Richardson J.W., Benoit W. Residual stress in WC–Co measured by neutron diffraction // Materials Science and Engineering: A. – 1996. – T. 209, № 1–2. – P. 197–205. – DOI: 10.1016/0921–5093(95)10147-0.
17. Yildiz A.B., Böhm A., Borgh I., Koko A., Reinhard C., Michalik S. Österberg E., Olovsjö S., Kritikos M., Lindberg F., Weidow J., Norgren S., Hedström P. In-situ synchrotron X-ray diffraction investigation of microstructure evolution in Cr-doped cemented carbide during high-temperature creep deformation // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2026. – T. 141. – Art. 108016. – DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2026.108016.

References

1. Artamonov E.V. Prochnost' i rabotosposobnost' smennykh tverdosplavnykh plastin sbornykh rezhushchikh instrumentov [Strength and performance of indexable carbide inserts of assembled cutting tools]. Tyumen: TyumGNGU, 2003. 192 P. (In Russ.).
2. Artamonov E.V., Tveryakov A.M., Shtin A.S. Opredelenie temperatury maksimal'noy rabotosposobnosti instrumental'nykh tverdykh splavov [Determination of temperature of maximum working capacity of tool hard alloys]. Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty), 2018, vol. 20, no. 3, P. 47–57. DOI: 10.17212/1994-6309-2018-20.3-47-57. (In Russ.).
3. Artamonov E.V., Chuykov S.S. Povyshenie rabotosposobnosti smennykh tverdosplavnykh plastin putem snyatiya vnutrennikh napryazheniy [Improving the performance of indexable carbide inserts by relieving internal stresses]. Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Pribory, mashiny i tekhnologii, 2010, no. 2 (90), P. 42–44. (In Russ.).
4. Badamshin A.M., Kovivchak V.S., Polonyankin D.A., Povoroznyuk S.N. Modifikatsiya tverdogo splava WC-Co pri vozdeystvii moshchnogo ionnogo puchka nanosekundnoy dlitel'nosti [Modification of hard alloy WC-Co with exposure to a powerful ion beam of nanosecond duration]. Polzunovskiy vestnik, 2024, no. 1, P. 258–263. DOI: 10.25712/ASTU.2072–8921.2024.01.033. (In Russ.).

5. Bogodukhov S.I., Kilov A.S., Shein E.A., Yasakov A.S., Khaybullin R.R. Povyshenie ekspluatatsionnykh kharakteristik tverdykh splavov termicheskoy obrabotkoy [Improving the performance characteristics of hard alloys by heat treatment]. Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta, 2011, no. 5 (124), P. 164–170. (In Russ.).
6. Gorbacheva T.B. Rentgenografiya tverdykh splavov [X-ray analysis of hard alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1985. 102 P. (In Russ.).
7. Davidenkov N.N. Nekotorye problemy mekhaniki materialov [Some problems of mechanics of materials]. Leningrad: Lenizdat, 1943. 152 P. (In Russ.).
8. Efimovich I.A., Artamonov E.V., Chuykov R.S. Interferometricheskiy metod issledovaniya modulya uprugosti i koeffitsienta Puassona instrumental'nykh materialov [Interferometric method for studying the elastic modulus and Poisson's ratio of tool materials]. Neft' i gaz Zapadnoy Sibiri: Proc. Int. Sci.-Tech. Conf. Tyumen: TyumGNGU, 2003, P. 33–34. (In Russ.).
9. Loshak M.G. Prochnost' i dolgovechnost' tverdykh splavov [Strength and durability of hard alloys]. Kiev: Naukova dumka, 1984. 327 P. (In Russ.).
10. Panov V.S., Zaytsev A.A. Tverdye splavy WC–Co, legirovannye karbidom tantala: obzor [WC–Co hard alloys alloyed with tantalum carbide: a review]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya, 2015, no. 2, P. 44–48. DOI: 10.17073/1997-308X-2015-2-44-48. (In Russ.).
11. Chuykov R.S. Povyshenie rabotosposobnosti smennykh tverdosplavnykh plastin putem snyatiya vnutrennikh napryazheniy [Improving the performance of indexable carbide inserts by relieving internal stresses]. Cand. tech. sci. diss.: 05.03.01. Tyumen: TyumGNGU, 2004. 154 P. (In Russ.).
12. Chuykov S.S. Vliyanie vnutrennikh napryazheniy v instrumental'nykh tverdykh splavakh na rabotosposobnost' sbornykh instrumentov [Influence of internal stresses in tool hard alloys on the performance of assembled tools]. Cand. tech. sci. diss.: 05.02.07. Tyumen: TyumGNGU, 2013. 141 P. (In Russ.).
13. Degeneve L., Mari D., Sousa Machado P.V.S., Jimenez-Piqué E. Distribution of the thermal residual stresses in the WC–Co microstructure by finite element method // Journal of the European Ceramic Society. – 2023. – No. 7. – P. 2818–2825. – DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc. 2022.11.058.
14. García J., Collado Ciprés V., Blomqvist A., Kaplan B. Cemented carbide microstructures: a review. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2019, vol. 80, P. 40–68. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2018.12.004.
15. Larsson C., Odén M. X-ray diffraction determination of residual stresses in functionally graded WC–Co composites. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2004, vol. 22, P. 177–184. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2004.06.002.
16. Mari D., Krawitz A.D., Richardson J.W., Benoit W. Residual stress in WC–Co measured by neutron diffraction. Materials Science and Engineering: A, 1996, vol. 209, no. 1–2, P. 197–205. DOI: 10.1016/0921–5093(95)10147-0.

17. Yildiz A.B., Böhm A., Borgh I., et al. In-situ synchrotron X-ray diffraction investigation of microstructure evolution in Cr-doped cemented carbide during high-temperature creep deformation. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2026, vol. 141, art. 108016. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2026.108016.

Статья поступила в редакцию: 16.09.2026
Статья принята к публикации: 02.11.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 621.81: 621.855

Влияние точности межосевого расстояния цилиндрических зубчатых передач на ожидаемые эксплуатационные показатели технологических и сельскохозяйственных машин

Шаабидов Шорахмат Аскарович
д-р. техн. наук, проф.
Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: shoobidov.shoraxmat@mail.ru

Мамасобиров Умид Мамазокирович
PhD, доц.
Ташкентский государственный технический университет имени Ислама
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: umidmamasobirov136@gmail.com

Мирзаев Кахрамон Каршибоевич
д-р. техн. наук, доц.
Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: mirzayevqahramon140@gmail.com

The effect of center distance accuracy of cylindrical gear transmissions on the operational performance of technological and agricultural machinery

Shaabidov Shorakhmat Askarovich
doctor of Technical Sciences, Professor
Tashkent State Techical University Named After Islam Karimov
Uzbekistan, Tashkent

Mamasobirov Umid Mamazokirovich
PhD, Associate Professor
Tashkent State Techical University Named After Islam Karimov
Uzbekistan, Tashkent

Mirzaev Kakhramon Karshiboevich
doctor of Technical Sciences, Associate Professor
Tashkent State Techical University Named After Islam Karimov
Uzbekistan, Tashkent

Библиографическое описание: Шаабидов Ш.А., Мамасобиров У.М., Мирзаев К.К. Влияние точности межосевого расстояния цилиндрических зубчатых передач на ожидаемые эксплуатационные показатели технологических и сельскохозяйственных машин // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23654

Аннотация

Обеспечение точности межосевого расстояния цилиндрических зубчатых передач, широко применяемых в технологических и сельскохозяйственных машинах, является одним из важных факторов повышения их эксплуатационных показателей, надёжности и долговечности. Точность межосевого расстояния оказывает непосредственное влияние на условия зацепления зубьев, величину бокового зазора, характер взаимодействия сопряжённых поверхностей и распределение нагрузки по контактной поверхности зубьев. Отклонение межосевого расстояния от установленного значения может привести к нарушению оптимальных условий работы зубчатой передачи, увеличению динамических нагрузок, уровня шума и вибрации, ускоренному износу рабочих поверхностей зубчатых колёс, а также снижению коэффициента полезного действия и срока службы механизма.

Современные методы конструирования и расчёта позволяют на основе установленных закономерностей обосновывать рациональные параметры различных машин и механизмов, а также обеспечивать требуемые качественные показатели изделий машиностроения. При этом значительную роль играет правильный выбор допусков размеров и посадок, допусков формы и отклонений взаимного положения поверхностей деталей, непосредственно влияющих на точность сборки и эксплуатационные характеристики зубчатых передач.

Данная статья посвящена повышению эксплуатационных показателей технологических и сельскохозяйственных машин обеспечением точности межосевого расстояния цилиндрических зубчатых передач.

Abstract

Ensuring the accuracy of the center distance of cylindrical gear drives, which are widely used in technological and agricultural machinery, is one of the important factors in improving their operational performance, reliability, and durability. The accuracy of the center distance directly affects the conditions of gear tooth meshing, the magnitude of the backlash, the nature of interaction between mating surfaces, and the distribution of load over the tooth contact surface. Deviation of the center distance from its specified value may lead to deterioration of the optimal operating conditions of the gear drive, an increase in dynamic loads, noise and vibration levels, accelerated wear of the working surfaces of the gear wheels, as well as a reduction in the efficiency and service life of the mechanism.

Modern design and calculation methods make it possible, based on established relationships, to substantiate rational parameters of various machines and mechanisms and to ensure the required quality characteristics of mechanical engineering products. In this regard, the proper selection of dimensional tolerances and fits, form tolerances, and deviations in the relative position of component surfaces plays a significant role, as these parameters directly affect assembly accuracy and the operational characteristics of gear drives.

This article is devoted to improving the operational performance of technological and agricultural machinery by ensuring the accuracy of the center distance of cylindrical gear drives.

Ключевые слова: точность, межосевое расстояние, погрешность, размерная цепь, соосность, метод неполной взаимозаменяемости, вероятностный метод.

Keywords: accuracy, center distance, error, dimensional chain, coaxiality, method of incomplete interchangeability, probabilistic method.

Введение

Технический и технологический процессы в самом широком смысле все более интенсивно проникают в различные сферы жизнедеятельности человека.

Основными показателями качества машин являются их производительность, надежность, эксплуатационные характеристики, которые тесно связаны с операциями сборки. По некоторым данным, трудоемкость сборочных работ в машиностроении составляет 30…35 % от общего трудозатрата на производство машин [1, 4, 7–11].

Качество сборки машин оценивается в первую очередь ее точностью - степенью соответствия точности параметров и показателей отдельных агрегатов, сборочных единиц и деталей значениям, заданными техническими требованиями. На стадии проектирования и конструирования с помощью размерного анализа устанавливают нужные методы достижения точности сборки сборочных единиц и общей сборки всей машины, а также одновременно выявляют допуски на размеры деталей.

Широкое применение в практике конструирования и производства расчетных методов обоснования показателей точности сборки является наиболее эффективным направлением решения вопросов повышения качества различных машин.

Целью работы является повышение эксплуатационных показателей технологических и сельскохозяйственных машин за счёт обеспечения точности межосевого расстояния цилиндрических зубчатых передач на основе размерного анализа. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1) обосновать выбор метода достижения точности межосевого расстояния (полная или неполная взаимозаменяемость, вероятностный метод) в зависимости от числа составляющих звеньев размерной цепи;

2) построить размерную цепь Б, определяющую точность межосевого расстояния, с учётом отклонений от соосности подшипников, смещений в сопряжениях с зазором и зазоров в подшипниках;

3) разработать последовательность расчёта ожидаемого поля рассеивания межосевого расстояния и его расчётных предельных отклонений вероятностным методом;

4) выполнить численную реализацию предложенной методики для конкретной цилиндрической зубчатой передачи и оценить точность сборки по условиям ГОСТ 1643 – 81;

5) определить границы применимости предложенной схемы размерного анализа и наметить направления её дальнейшего развития.

Материалы и методы

При расчёте размерных цепей применяются два принципиально различных подхода, различающихся направлением решения и областью применения.

Первый подход — проектный (прямая задача). Заданы номинальное значение, предельные отклонения и допуск исходного (замыкающего) звена, а также номинальные значения составляющих звеньев. Требуется определить номинальные значения, предельные

отклонения и допуски составляющих размеров, обеспечивающие заданную точность замыкающего звена. Прямая задача решается на стадии проектирования: именно она позволяет назначить допуски на размеры деталей, отклонения формы и расположения поверхностей, посадки подшипников и сопряжений с зазором. Решение выполняется методами полной взаимозаменяемости (при числе составляющих звеньев $n < 5$), неполной взаимозаменяемости (при $n > 7$) либо групповой взаимозаменяемости и регулирования (метод компенсаторов). При вероятностном методе расчёт ведётся по характеристикам рассеивания: координате середины поля допуска em, допуску t, коэффициентам относительного рассеивания λ и коэффициентам приведения C.

Второй подход — проверочный (обратная задача). Заданы номинальные значения, предельные отклонения и допуски всех составляющих звеньев; требуется определить номинальное значение, предельные отклонения и допуск замыкающего звена, а затем оценить, удовлетворяют ли они техническим требованиям (например, гарантированному боковому зазору в зубчатой передаче). Обратная задача решается на стадии анализа существующей или проектируемой конструкции и служит основой для верификации принятых допусков.

Для каждого подхода характеристики размеров описываются номинальной величиной Y, предельными отклонениями es и ei, допуском t, координатой середины поля допуска em. При вероятностном методе дополнительно учитываются коэффициенты α (относительной асимметрии) и K (относительного рассеивания), принимаемые по рекомендациям [1, 2].

В практике современного машиностроения при проектировании и производстве сельскохозяйственных и других машин принято, при большом числе составляющих звеньев в размерной цепи (при $n > 7$), требуемая точность исходного замыкающего размера обеспечивается по методу неполной, при $n < 5$ - методом полной взаимозаменяемости.

В настоящей работе реализуется проектный подход применительно к размерной цепи, замыкающим звеном которой является межосевое расстояние цилиндрической зубчатой передачи. Последовательность расчёта включает:

построение размерной цепи и выявление составляющих звеньев;

классификацию звеньев по характеру влияния на замыкающий размер (скалярные, векторные, звенья сопряжений с зазором);

определение коэффициентов приведения C по расположению передачи относительно опор;

выбор метода достижения точности (неполная взаимозаменяемость, вероятностный метод) в зависимости от числа составляющих звеньев;

расчёт номинального размера, предельных отклонений и координаты середины поля допуска замыкающего звена по формулам (1)–(3);

расчёт ожидаемого поля рассеивания по формуле (4) и математических ожиданий суммарных размеров по формуле (5);

определение расчётных предельных отклонений (6)–(7), координаты середины и расчётного допуска (8)–(9), расчётных предельных значений замыкающего размера (10)–(11);

оценку точности сборки по условиям (12)–(13) и, при необходимости, разработку мероприятий по обеспечению требуемой точности.

Методика расчёта базируется на положениях ГОСТ 1643 – 81 и рекомендациях [2, 4, 5].

На рисунке 1 приведены эскиз цилиндрической зубчатой передачи и схема размерной цепи Б, определяющей точность межосевого расстояния. На схеме размерной цепи Б обозначены: $Б_Д$ — исходный замыкающий размер — расстояние между осями вращения валов в средней плоскости зубчатых колёс (межосевое расстояние a_W); $Б_1$ и $Б_5$ — отклонения от соосности наружных колец подшипников — радиальные биения дорожек качения одного вала; $Б_{10}$ и $Б_{14}$ — то же другого вала; $Б_2$ и $Б_6$ — смещения осей наружных колец подшипников одного вала в пределах посадочного зазора в отверстии корпуса; $Б_{11}$ и $Б_{15}$ — то же другого вала; $Б_9$ — расстояние между осями отверстий корпуса; $Б_3$, $Б_7$, $Б_{12}$, $Б_{16}$ — смещения центров дорожек качения внутренних колец подшипников, вызванные наличием зазоров в подшипниках [3, 5]; $Б_4$, $Б_8$, $Б_{13}$, $Б_{17}$ — отклонения от соосности наружных и внутренних цилиндрических поверхностей втулок.

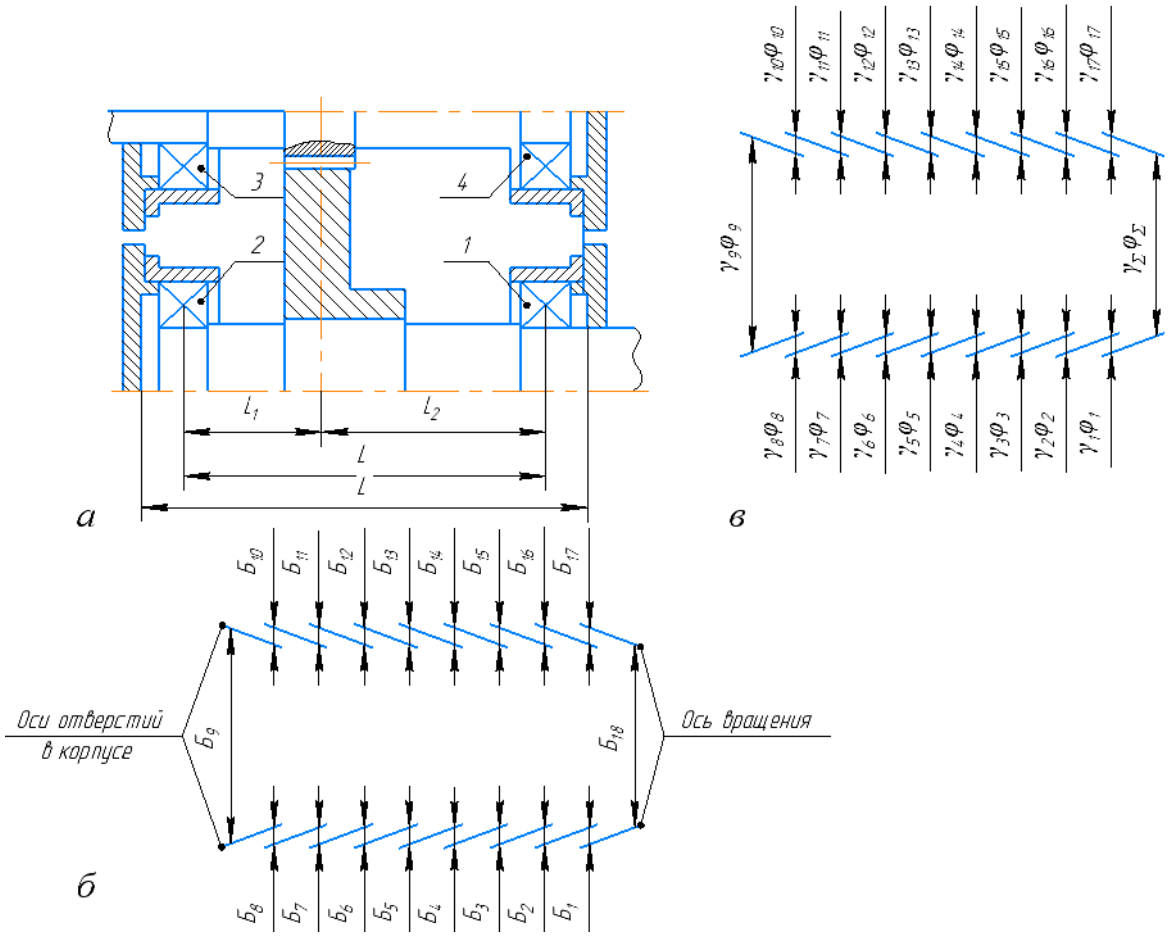


Рисунок 1. Зубчатая цилиндрическая передача: а – схематический чертеж; б – схема размерной цепи Б; в – схема размерных цепей γ и φ

При наличии осевых сил зазоры в самих подшипниках с той или другой стороны вала выбираются и, следовательно, размеры $Б_3$ и $Б_{12}$ или $Б_7$ и $Б_{16}$ из расчётной схемы исключаются.

По характеру влияния на исходный замыкающий размер составляющие звенья (размеры) различаются как скалярные, векторные и относящиеся к сопряжениям с зазорами. В рассматриваемой размерной цепи (рис. 1, б) составляющие размеры являются: $Б_9$ —

скалярной величиной; $Б_1$, $Б_4$, $Б_5$, $Б_8$, $Б_{10}$, $Б_{13}$, $Б_{14}$ и $Б_{17}$ — векторными величинами; $Б_2$, $Б_6$, $Б_{11}$, $Б_{15}$, а также $Б_3$ и $Б_{12}$ или $Б_7$ и $Б_{16}$ — относящимися к сопряжениям с зазорами, полностью выбираемыми в определённом направлении действующими на опоры валов силами. Чтобы определить направления этих сил, требуется выполнить силовой расчёт. Для упрощения задачи принято, что все зазоры в сопряжениях выбираются в направлении линии исходного замыкающего размера в одну сторону, что позволяет отказаться от силового расчёта; это допущение ограничивает область применения схемы и должно учитываться при интерпретации результатов.

С учётом того, что исходный замыкающий размер рассматривается в средней плоскости зубчатых колёс, коэффициенты приведения С размеров B_i определяются в зависимости от расположения передачи относительно опор (рис. 1, а): $C_9 = 1{,}0$; $C_1 = C_4 = C_{14} = C_{17} = l_1/l$; $C_5 = C_8 = C_{10} = C_{13} = l_2/l$. Коэффициенты составляющих размеров, относящихся к сопряжениям с зазором, с учётом принятого упрощения: $C_2 = C_3 = C_{15} = C_{16} = l_1/l$; $C_6 = C_7 = C_{11} = C_{12} = l_1/l$. Коэффициент положителен, если сила, действующая на опору, увеличивает межосевое расстояние.

При отсутствии в конструкции специальных устройств для регулировки межосевого расстояния и большом числе составляющих звеньев в размерной цепи ($n - 1 > 6$) точность исходного замыкающего размера достигается по методу неполной взаимозаменяемости, а расчёт выполняется вероятностным методом.

Номинальный размер исходного замыкающего звена $Б_\Delta$ размерной цепи из n звеньев:

$$B_\Delta = \sum_{i=1}^{n-1} C_i B_i \,. \tag{1}$$

Так как у всех составляющих размеров, кроме $Б_9$, номинальные значения равны нулю, то по формуле (1) $Б_\Delta = Б_9$.

Предельные отклонения размера исходного замыкающего звена — верхнее $es(Б_\Delta)$ и нижнее $ei(Б_\Delta)$ — равны:

$$es(B_\Delta) = \sum_{i=1}^{n-1} es(B_i)\, C_i; \qquad ei(B_\Delta) = \sum_{i=1}^{n-1} ei(B_i)\, C_i \ . \tag{2}$$

Координата середины поля допуска размера исходного замыкающего звена:

$$em(B_\Delta) = \sum_{i=1}^{n-1} em(B_i)\, C_i \,. \tag{3}$$

Для того чтобы определить предельные отклонения размера исходного замыкающего звена, необходимо знать предельные отклонения размеров составляющих звеньев цепи. Характеристика размера B_Δ: $em(B_\Delta) = 0$; $t(B_\Delta) = 2|f_a|$.

Отклонение от соосности по причине радиального биения наружного кольца равно половине радиального биения Ra. Но так как это отклонение может быть направлено в любую сторону, то в расчёт принимается полное биение и поэтому $em_{vi} = 0$, $t_{vi} = Ra_i$ [1, 2]. Для составляющих размеров $Б_1$, $Б_5$, $Б_{10}$, $Б_{14}$: $a_i = 0$. Начальный радиальный зазор в подшипниках: Z_{min} и Z_{max} [5].

Без учёта изменения зазора в подшипнике от натяга в сопряжении подшипников с валом можно принять характеристики: $t_z = Z_{max} - Z_{min}$; $em_z = 0{,}5t_z$; $a_i = 0$; $K_i = 1{,}0$ для составляющих размеров $Б_3$ и $Б_{12}$ или $Б_7$ и $Б_{16}$.

Предельные отклонения наружных колец подшипников: $es_b = 0$; $-ei$; следовательно $em_{bi} = -0{,}5ei$; $t_b = 2|ei|$; для охватываемой детали $\alpha_b = 0{,}1$; $K_b = 1{,}2$.

Предельные отклонения отверстия корпуса: es_a; $ei_a = 0$; следовательно $em_a = 0{,}5es_a$; $t_a = 2|ei_a|$; для охватывающей детали $\alpha_a = -0{,}1$; $K_a = 1{,}2$.

Параметры отклонений размеров сопряжённых вала и отверстия em_{bi}, t_{bi} и em_{ai}, t_{ai} относятся к соответствующим размерам $Б_2$, $Б_6$, $Б_{11}$ и $Б_{15}$. Коэффициенты α и K принимаются в соответствии с рекомендациями, приведёнными в работах [1, 2].

По вышеприведённым данным рассчитывается величина ожидаемого поля рассеивания исходного замыкающего размера:

$$w_\Delta = \frac{1}{K_\Delta}\sqrt{K_{\Sigma s}^2\, t_{\Sigma s}^2 + K_{\Sigma v}^2\, t_{\Sigma v}^2 + K_{\Sigma z}^2\, t_{\Sigma z}^2}\,. \tag{4}$$

Вычисляются математические ожидания суммарного размера скалярных величин $m_{\Sigma s}$ и суммарных смещений в сопряжении с зазором $m_{\Sigma z}$:

$$m_{\Sigma s} = C_9\,(em_9 + a_9 t_9)$$

$$\begin{aligned} m_{\Sigma z} = \frac{1}{2}\Big\{ & \big|(em_{a_2} - em_{b_2}) + 0{,}5\,t_{z_3} + (a_{a_2}t_{a_2} - a_{b_2}t_{b_2})\big| \\ & + \big|(em_{a_6} - em_{b_6}) + 0{,}5\,t_{z_7} + (a_{a_6}t_{a_6} - a_{b_6}t_{b_6})\big| \\ & + \big|(em_{a_{11}} - em_{b_{11}}) + 0{,}5\,t_{z_{12}} + (a_{a_{11}}t_{a_{11}} - a_{b_{11}}t_{b_{11}})\big| \\ & + \big|(em_{a_{15}} - em_{b_{15}}) + 0{,}5\,t_{z_{16}} + (a_{a_{15}}t_{a_{15}} - a_{b_{15}}t_{b_{15}})\big| \Big\} \end{aligned} \tag{5}$$

Вычисляются расчётные характеристики исходного замыкающего размера (то есть верхнее и нижнее расчётные предельные отклонения):

$$es_\Delta^1 = m_{\Sigma s} + m_{\Sigma z} + (0{,}5 + \lambda_\Delta)\,t_\Delta; \tag{6}$$

$$ei_\Delta^1 = m_{\Sigma s} - m_{\Sigma z} - (0{,}5 + \lambda_\Delta)\,t_\Delta\,. \tag{7}$$

Рассчитываются координата середины и расчётный допуск исходного замыкающего размера:

$$em_\Delta^1 = \frac{1}{2}\left(es_\Delta^1 + ei_\Delta^1\right)\,; \tag{8}$$

$$t_\Delta^1 = es_\Delta^1 - ei_\Delta^1\,. \tag{9}$$

Определяются расчётные предельные значения исходного замыкающего размера:

$$Y_{\Delta\,\max}^1 = Y_\Delta + es_\Delta^1; \tag{10}$$

$$Y_{\Delta\,\min}^1 = Y_\Delta + ei_\Delta^1\,, \tag{11}$$

где Y_Δ — номинальное значение исходного замыкающего размера.

Оценивается точность сборки по условиям:

$$Y^1_{\Delta\ \max} \le Y_{\Delta\ \max}; \qquad Y^1_{\Delta\ \min} \ge Y_{\Delta\ \min}\ ; \tag{12}$$

или

$$em^1_\Delta \approx em_\Delta; \qquad t^1_\Delta \approx t_\Delta\ , \tag{13}$$

где em_Δ и t_Δ — заданные координата середины поля допуска и допуск исходного замыкающего размера. При необходимости предлагаются мероприятия для обеспечения требуемой точности.

Результаты и обсуждения

В соответствии условиями ГОСТ 1643-81 показателями точности сборки (ремонта) являются: точность межосевого расстояния, обеспечивающая в зацеплении гарантированный боковой зазор; параллельность и перекос осей, обеспечивающих показатели контакта зубьев; предельные зазоры в установленных подшипниках.

Расчёт по изложенной методике выполнен для цилиндрической зубчатой передачи технологической машины со следующими исходными данными: модуль m = 4 мм; числа зубьев $z_1 = 20$, $z_2 = 40$; делительное межосевое расстояние $a_W = 120$ мм; допуск межосевого расстояния по ГОСТ 1643 – 81 для степени точности 8 — $t_\Delta = 2|f_a| = 0{,}090$ мм ($f_a = \pm 0{,}045$ мм); число составляющих звеньев $n - 1 = 16$, что соответствует условию $n - 1 > 6$ и обусловливает применение вероятностного метода по методу неполной взаимозаменяемости.

Коэффициенты приведения приняты по расположению передачи относительно опор: $C_9 = 1{,}0$; $C_1 = C_4 = C_{14} = C_{17} = l_1/l = 0{,}4$; $C_5 = C_8 = C_{10} = C_{13} = l_2/l = 0{,}6$; для звеньев сопряжений с зазором $C_2 = C_3 = C_{15} = C_{16} = 0{,}4$; $C_6 = C_7 = C_{11} = C_{12} = 0{,}6$.

Характеристики составляющих звеньев: для звена $Б_9$ (расстояние между осями отверстий корпуса) $t_9 = 0{,}046$ мм, $em_9 = 0$; для векторных звеньев $Б_1$, $Б_4$, $Б_5$, $Б_8$, $Б_{10}$, $Б_{13}$, $Б_{14}$, $Б_{17}$ принято em = 0, t = Ra (радиальное биение наружных колец подшипников Ra = 0,010 мм); для звеньев сопряжений с зазором $Б_2$, $Б_6$, $Б_{11}$, $Б_{15}$ приняты предельные отклонения отверстия корпуса $es_a = +0{,}021$ мм, $ei_a = 0$ и вала $es_b = 0$, $ei_b = -0{,}013$ мм, откуда $t_a = 0{,}021$ мм, $em_a = +0{,}0105$ мм, $t_b = 0{,}013$ мм, $em_b = -0{,}0065$ мм; для звеньев $Б_3$, $Б_{12}$ (зазор в подшипнике) $t_z = Z_{max} - Z_{min} = 0{,}020$ мм, $em_z = 0{,}5t_z = 0{,}010$ мм.

По формуле (1) номинальный размер замыкающего звена: $Б_\Delta = Б_9 = 120$ мм.

По формуле (4) ожидаемое поле рассеивания замыкающего размера: $w_\Delta = 0{,}078$ мм.

По формулам (6)–(9) получены расчётные предельные отклонения: $es^1_\Delta = +0{,}039$ мм; $ei^1_\Delta = -0{,}039$ мм; координата середины поля допуска $em^1_\Delta = 0$; расчётный допуск $t^1_\Delta = 0{,}078$ мм.

Расчётные предельные значения замыкающего размера по (10)–(11): $Y^1_{\Delta max} = 120{,}039$ мм; $Y^1_{\Delta min} = 119{,}961$ мм.

Проверка по условию (12): $Y^1_{\Delta max}$ = 120,039 мм ≤ $Y_{\Delta max}$ = 120,045 мм; $Y^1_{\Delta min}$ = 119,961 мм ≥ $Y_{\Delta min}$ = 119,955 мм — условие выполняется. Расчётный допуск t^1_{Δ} = 0,078 мм не превышает заданного t_{Δ} = 0,090 мм, следовательно, точность сборки по межосевому расстоянию обеспечивается при принятых допусках составляющих звеньев.

Таким образом, численная реализация предложенной схемы размерного анализа подтверждает её работоспособность для рассматриваемой передачи и позволяет количественно оценить вклад каждого составляющего звена в поле рассеивания межосевого расстояния.

Заключение

Обеспечение точности межосевого расстояния цилиндрических зубчатых передач технологических и сельскохозяйственных машин является одним из факторов, влияющих на показатели качества этих машин. Предложена методика размерного анализа межосевого расстояния, основанная на построении размерной цепи Б с учётом отклонений от соосности подшипников, смещений в сопряжениях с зазором и зазоров в подшипниках и реализуемая вероятностным методом при числе составляющих звеньев n − 1 > 6.

Следует подчеркнуть границы применимости предложенной схемы. Во-первых, принято допущение об одностороннем выборе всех зазоров в направлении линии замыкающего размера, что позволило отказаться от силового расчёта; при произвольном направлении действия сил на опоры это допущение требует проверки. Во-вторых, при наличии осевых сил часть звеньев ($Б_3$ и $Б_{12}$ либо $Б_7$ и $Б_{16}$) исключается из расчётной схемы, то есть схема описывает частный случай нагружения. В-третьих, коэффициенты приведения С определены для конкретного расположения передачи относительно опор и не являются универсальными. Наконец, приведённые результаты получены для одной передачи с конкретными исходными данными и не претендуют на обобщение без дополнительной верификации на выборке передач различных типоразмеров.

В этих границах методика позволяет на стадии проектирования оценить ожидаемое поле рассеивания межосевого расстояния, сопоставить его с допуском по ГОСТ 1643 – 81 и обоснованно назначить допуски составляющих звеньев. Дальнейшее развитие работы предполагает включение силового расчёта для определения направлений выбора зазоров, расширение схемы на регулируемые передачи и экспериментальную проверку расчётных результатов.

Список литературы

1. Анохин В.М., Бирич В.В., Статкевич А.М. Порядок подбора и расчета подшипников качения / Белорусский национальный технический университет. – 2010. – 75 с.
2. Дунаев П.Ф., Леликов О.П. Расчет допусков размеров. 5-е изд., испр. – М.: Инновационное машиностроение, 2021. – 400 с.
3. Гинзбург Е.Г., Голованов Н.Ф. и др. Зубчатые передачи: Справочник / Под общ. ред. Е.Г. Гинзбурга. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1980. – 416 с.

4. Ковалевский В.И., Ковалевский С.В., Шевцов Ю.Д. Обеспечение точности сборки при производстве и ремонте машин: Учебное пособие. – Краснодар: Изд. Инфра-Инженерия, 2022. – 252 с.
5. Маталин А.А. Технология машиностроения: Учебник.: ил. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1985. – 496 с.
6. Попок Н.П. Основы технологии машиностроения: Учебное пособие/Н.Н.Попок, В.И.Абрамов. – Новополцк: ПГУ, 2020. – 272 с.
7. Новиков М.П. Основы технологии сборки машин и механизмов. – 5-е изд., испр.: ил. – М.: Машиностроение, 1980. – 552 с.
8. Ковалевский В.И. Обеспечение точности сборки машин и механизмов. Учебно-методическое пособие к лекциям и практическим занятиям для студентов дневной и заочной форм обучения специальности 120100 – Технология машиностроения / Кубан. гос. технол. ун-т; Сост. В.И. Ковалевский. – Краснодар: Кубан. гос. технол. ун-т, 2003. – 57 с.
9. Осетров В.Г., Федоров Б.Ф. Сборка машин с компенсаторами.: ил. – М.: Машиностроение, 1993. – 96 с.
10. Справочник технолога-машиностроителя: В 2-х т. С74 Т. 2/Под ред. А.М. Дальского, А.Г. Суслова, А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. – 5-е изд., исправл. – М.: Машиностроение-1, 2003 г. 944 с.
11. Ковалевский В.И., Иосифов В.В. Технологический процесс сборки зубчатых передач. Обеспечение точности сборки. Методическое пособие к лабораторным и практическим работам по технологии машиностроения для студентов специальностей 120100 – Технология машиностроения, 150200 – Автомобили и автомобильное хозяйство / Кубан. гос. технол. ун-т; Сост. В.И. Ковалевский, В.В. Иосифов. – Краснодар: Кубан. гос. технол. ун-т, 2001. – 51 с.

References

1. Desnica E. et al. Selection, dimensioning and maintenance of roller bearings // International Conference on Organization and Technology of Maintenance. – Cham: Springer International Publishing, 2022. – P. 133–142.
2. Dunaev P.F., Lelikov O.P. Calculation of Dimensional Tolerances. 5th ed., revised. – Moscow: Innovative Mechanical Engineering, 2021. – 400 P.
3. Peng X., Zhou J. Optimization design for dynamic characteristics of face gear drive with surface-active modification // Mechanism and Machine Theory. – 2022. – Vol. 176.
4. Liu X. Optimization methods for manufacturing production lines based on precision machining and automated assembly // International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM). – 2026. – Vol. 20. – P. 727–739.
5. Matalin A.A. Manufacturing Technology: Textbook. – Leningrad: Mashinostroenie, Leningrad Branch, 1985. – 496 P.

6. Popok, N.P., Abramov, V.I. Fundamentals of Mechanical Engineering Technology: Study Guide. – Novopolotsk: PSU, 2020. – 272 P.
7. Formentini G., Boix Rodríguez N., Favi C. Design for manufacturing and assembly methods in the product development process of mechanical products: a systematic literature review // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2022. – Vol. 120. – P. 4307–4334.
8. Liu X. Optimization methods for manufacturing production lines based on precision machining and automated assembly // International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM). – 2026. – Vol. 20. – P. 727–739.
9. Abbyasov V.M. et al. Rear axel assembly process structure formation using universal assembly conveyor // AIP Conference Proceedings. – 2022. – Vol. 2632.
10. Youssef H.A., El-Hofy H.A., Ahmed M.H. Manufacturing technology: materials, processes, and equipment. – Crc Press. – 2023.
11. Terniuk M.E. et al. Gear manufacturing accuracy prediction, control, and management // Novikov/Conformal Gearing: Scientific Theory and Practice. – Cham: Springer International Publishing, 2022. – P. 215–323.

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОДОВОЛЬСТВЕННЫХ ПРОДУКТОВ И ПИЩЕВАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

Статья поступила в редакцию: 23.10.2026
Статья принята к публикации: 04.11.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 615.32

DOI: 10.32743/UniTech.2026.152.11.23666

Антиоксидантная и технологическая эффективность биоактивных соединений имбиря (Zingiber officinale) в пищевых системах

Азизходжаева Мохира Хусниддинхужа кизи
докторант
Ташкентский химико-технологический институт, Республика Узбекистан
г. Ташкент
E-mail: azizxojayevamohira@gmail.com

Хасанов Аббос Хасанович
доц.
Ташкентский химико-технологический институт, Республика Узбекистан
г. Ташкент
E-mail: hasanabbos196@gmail.com

Antioxidant and technological efficacy of ginger (Zingiber officinale) bioactive compounds in food systems

Azizhodjayeva Mohira Xusniddinxo'ja qizi
Doctoral candidate, Tashkent Chemical-Technological Institute
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Xasanov Abbos Xasanovich
Associate professor
Tashkent Institute of Chemical Technology
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

Современный мировой рынок продуктов питания характеризуется растущим потребительским спросом на изделия, которые не только обладают пищевой ценностью, но и проявляют профилактические и терапевтические свойства. В данном исследовании рассматриваются многогранные функциональные характеристики имбиря в пищевой промышленности, а также его роль в повышении качества и безопасности продукции.

Библиографическое описание: Азизходжаева М.Х. кизи, Хасанов А.Х. Антиоксидантная и технологическая эффективность биоактивных соединений имбиря (Zingiber officinale) в пищевых системах // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23666

Несмотря на широкую известность фармакологических свойств имбиря, его влияние на срок годности и биохимическую стабильность сложных пищевых матриц до сих пор не было систематически исследовано в достаточной степени. Актуальность работы обусловлена необходимостью выявления механизмов взаимодействия гингеролов и других фенольных соединений имбиря с пищевыми компонентами, а также необходимостью разработки на основе данного сырья функциональных продуктов с высокой биологической ценностью. Научная новизна исследования заключается в определении эффективности экстракта имбиря в качестве мощного антиоксиданта, замедляющего окислительные процессы в пищевых продуктах, и природного биоконсерванта против патогенной микрофлоры.

Рассматривается влияние концентрации имбирных компонентов на физико-химические, микробиологические и технологические показатели готовой продукции. Отдельное внимание уделяется совместимости биоактивных веществ имбиря с компонентами пищевых матриц, их устойчивости при технологической обработке и перспективам использования в качестве ингредиентов для создания продуктов с улучшенными потребительскими свойствами. Обобщение научных данных позволяет оценить потенциал имбиря как натурального источника антиоксидантов и определить направления его дальнейшего применения в пищевой промышленности.

Abstract

The modern global food market is characterized by growing consumer demand for products that not only provide nutritional value but also offer preventive and therapeutic benefits. This study examines the diverse functional properties of ginger in the food industry and its role in improving product quality and safety. Despite the widely recognized pharmacological properties of ginger, its effects on shelf life and the biochemical stability of complex food matrices have not yet been sufficiently and systematically investigated. The relevance of this study is determined by the need to elucidate the mechanisms of interaction between gingerols and other phenolic compounds in ginger and food components, as well as to develop functional foods with high biological value based on this raw material. The scientific novelty of the study lies in assessing the effectiveness of ginger extract as a potent antioxidant that slows oxidative processes in food products and as a natural biopreservative against pathogenic microorganisms.

The study examines the effects of ginger component concentrations on the physicochemical, microbiological, and technological properties of finished products. Particular attention is paid to the compatibility of ginger bioactive compounds with food matrix components, their stability during technological processing, and their potential use as ingredients in the development of products with improved consumer properties. The analysis of scientific data makes it possible to assess the potential of ginger as a natural source of antioxidants and to identify promising directions for its further application in the food industry.

Ключевые слова: имбирь (Zingiber officinale), антиоксидантная активность, гингерол, пробиотики, функциональное питание, фенольные соединения, биохимическая стабильность.

Keywords: ginger (Zingiber officinale), antioxidant activity, gingerol, probiotics, functional nutrition, phenolic compounds, biochemical stability.

Введение

В XXI веке обеспечение продовольственной безопасности и принципы здорового питания возведены во всем мире в ранг государственной политики. Современные потребители стремятся выбирать продукты, которые не только приятны на вкус, но и биологически полезны для организма, а также не содержат искусственных красителей и химических консервантов. В связи с этим одной из самых актуальных задач предприятий пищевой промышленности является поиск натурального сырья для замены синтетических добавок с целью продления срока годности и улучшения качества продукции. Имбирь (*Zingiber officinale*), обладающий богатым химическим составом и многофункциональностью, представляет собой уникальное растение, полностью отвечающее данным требованиям. Родиной имбиря является Юго-Восточная Азия, в настоящее время он культивируется преимущественно в тропических странах, таких как Индия, Китай, Ямайка и Нигерия. Используемой частью растения является его узловатое, ветвистое корневище, покрытое желтовато-бурой кожицей и имеющее бледно-желтую мякоть внутри. Имбирь обладает острым, жгучим вкусом и приятным ароматом летучих эфирных масел.

Имбирь (*Zingiber officinale*) представляет собой сложную фитохимическую матрицу, содержащую более 400 биоактивных соединений [1]. Его актуальность в пищевой промышленности напрямую связана с его мощными антиоксидантными и антимикробными свойствами. Окисление липидов (прогоркание) и пролиферация патогенных микроорганизмов остаются ключевыми проблемами. Гингерол, шогаол и эфирные масла, содержащиеся в имбире, нейтрализуют свободные радикалы, тем самым обеспечивая длительное сохранение органолептических характеристик продуктов. Это, в свою очередь, позволяет производителям соответствовать требованиям концепции «Чистая этикетка» (Clean Label). Переход на эти стандарты дает возможность полностью исключить из состава продуктов химические добавки с индексом «Е» [3].

Научная новизна исследования

Роль имбиря в разработке функциональных пищевых продуктов вышла на новый научный уровень. Теперь он изучается не только как ароматическая пряность, но и как ключевой компонент продуктов, предназначенных для профилактики диабета, ожирения и расстройств пищеварительной системы. Использование имбиря в пищевой промышленности считается одним из самых перспективных направлений современной биотехнологии и функционального питания [3]. В пищевой промышленности имбирь выступает в качестве многофункционального биокомпонента. Кроме того, он исследуется как антимикробный барьер в системах «активной упаковки», представляющих собой новейшее направление в пищевой индустрии.

Антиоксидантные свойства имбиря и его технологическое значение

Корневище имбиря (*Zingiber officinale*) проявляет мощную антиоксидантную активность благодаря содержащимся в нем фенольным соединениям, в частности гингеролу, шогаолу и зингерону. Это свойство играет важнейшую роль в ингибировании окисления

ненасыщенных жирных кислот в продукте. Нейтрализуя свободные радикалы, антиоксиданты предотвращают ухудшение органолептических характеристик продукта, таких как вкус и аромат [14].

Материалы и методы

Материалы. В качестве основного сырья и объекта исследования в данной работе использовались корневища имбиря (*Zingiber officinale*) — многолетнего растения семейства имбирных (*Zingiberaceae*), собранного в сезоне 2025–2026 годов.

Экстракция биологически активных соединений. Сначала 100 г корневищ имбиря очищали от механических примесей, промывали дистиллированной водой и нарезали ломтиками толщиной 3–5 мм. Образцы сушили на открытом воздухе в защищенном от прямых солнечных лучей месте при средней температуре 20–30°C и относительной влажности 40–50 % до достижения постоянной массы (влажность примерно 10–12 %). Высушенные образцы измельчали в лабораторных условиях и хранили в герметичных контейнерах при температуре 4°C до проведения дальнейшего анализа. Для извлечения антиоксидантных соединений из порошка имбиря применялся метод мацерации. Порошок смешивали с 70 %-м раствором этанола в соотношении 1:10 (мас./об.). Процесс экстракции осуществлялся при комнатной температуре 25°C в темноте в течение 24 часов с использованием магнитной мешалки. Полученный экстракт фильтровали через бумажный фильтр и хранили при 4°C до проведения дальнейшего анализа.

Антиоксидантная активность по методу DPPH. Антиоксидантный потенциал определяли с использованием метода связывания свободных радикалов 2,2-дифенил-1-пикрилгидразила (DPPH). Экстракт образца смешивали с раствором DPPH и инкубировали в темноте в течение 30 минут. Оптическую плотность (абсорбцию) измеряли на спектрофотометре при длине волны 517 нм. Рассчитывали эффективность связывания радикалов (%) относительно контроля. [12,8].

Физико-химический анализ. Значение pH образцов измеряли при комнатной температуре с помощью цифрового pH-метра FiveGo. Титруемую кислотность определяли путем титрования раствором 0,1 н. NaOH с использованием индикатора фенолфталеина.

Микробиологический анализ. Жизнеспособность микроорганизмов определяли методом серийных разведений и посева на чашки. Образцы разводили в стерильном физиологическом растворе (0,85 % NaCl) и инокулировали на питательную среду. Чашки Петри инкубировали при 37°C в течение 48–72 часов. Количество жизнеспособных клеток рассчитывали и выражали в КОЕ/г.

Химические реактивы. Все химикаты и реагенты, использованные в данном исследовании, имели квалификацию аналитической чистоты. 2,2-дифенил-1-пикрилгидразил (DPPH) и галловая кислота были приобретены у компании Sigma-Aldrich (Сент-Луис, штат Миссури, США). Реактив Фолина-Чокальтеу, карбонат натрия и этанол (99,8 %) были получены от компании Merck (Дармштадт, Германия). Питательные среды для микробиологического анализа поставлялись компанией HiMedia Laboratories (Мумбаи, Индия). Все растворы готовили с использованием дистиллированной воды.

Результаты и обсуждение

На первом этапе исследования оценивали эффективность извлечения биологически активных фенольных соединений из высушенного и измельченного корневища имбиря (*Zingiber officinale*) в зависимости от концентрации водно-этанольного экстрагента при постоянном гидромодуле 1:10 и температуре (25 ± 2) °C (таблица 1). Установлено, что применение 70 %-го раствора этанола обеспечило максимальный выход сухих экстрактивных веществ (18,2 ± 0,4 %) и суммарных полифенолов (24,6 ± 0,5 мг ГКЭ/г сухого сырья), в том числе целевых компонентов — 6-гингерола (8,42 ± 0,18 мг/г) и 6-шогаола (2,15 ± 0,07 мг/г). По сравнению с водной экстракцией выход 6-гингерола при использовании 70 %-го этанола возрос в 3,9 раза, а антирадикальная активность экстракта по тесту ингибирования стабильного радикала DPPH достигла 84,6 ± 1,2 % (IC50 = 65,1 ± 1,4 мкг/мл). Дальнейшее повышение крепости спирта до 96 % приводило к снижению выхода полифенолов на 13,8 % вследствие ограниченной растворимости полярных гликозидных и фенолокислотных фракций. Полученные закономерности согласуются с литературными данными о биполярной природе экстрагента 70 %-й концентрации, оптимальной для одновременной солюбилизации умеренно липофильных гингеролов, шогаолов и гидрофильных фенольных кислот [1; 6].

Таблица 1. Влияние концентрации экстрагента (гидромодуль 1:10) на выход биоактивных соединений и антирадикальную активность экстракта имбиря (Zingiber officinale), M ± m (n = 3)

Экстрагент (соотношение 1:10)	Выход сухих веществ, %	Сумма полифенолов, мг ГКЭ/г	6-гингерол / 6-шогаол, мг/г	Ингибирование DPPH, %
Вода дистиллированная	11,4 ± 0,3	10,8 ± 0,4	2,14 ± 0,09 / 0,48 ± 0,03	48,2 ± 1,1
Этанол 40 %	15,1 ± 0,4	17,9 ± 0,5	5,63 ± 0,14 / 1,32 ± 0,05	69,5 ± 1,3
Этанол 70 % (оптимум)	**18,2 ± 0,4**	**24,6 ± 0,5**	**8,42 ± 0,18 / 2,15 ± 0,07**	**84,6 ± 1,2**
Этанол 96 %	14,6 ± 0,3	21,2 ± 0,4	7,95 ± 0,16 / 2,04 ± 0,06	79,1 ± 1,1

На втором этапе полученный водно-этанольный экстракт имбиря (после вакуумного удаления спиртовой фракции и стандартизации по сухим веществам) вносили в модельную кисломолочную пищевую систему (йогуртную основу) в дозировках 1,0; 2,0 и 3,0 % к массе сырья. Комплексную оценку физико-химических, антиоксидантных и микробиологических показателей проводили на 1, 7, 14 и 21-е сутки холодильного хранения при температуре (4 ± 2) °C (таблица 2, рисунок 1). Введение экстракта имбиря статистически значимо ($p < 0,05$) повысило способность образцов связывать свободные радикалы DPPH: на 1-е сутки хранения антирадикальная активность контрольного образца составляла 24,5 ± 0,8 %, тогда как при внесении 1,0; 2,0 и 3,0 % экстракта она возросла до 46,2 ± 1,0 % (в 1,9 раза), 64,8 ± 1,1 % (в 2,6 раза) и 72,4 ± 1,2 % (в 3,0 раза) соответственно. К 21-м суткам хранения антиоксидантная активность в обогащенных образцах сохранялась на уровне 96,1–96,4 % от исходной (44,5 ± 0,9 %; 62,4 ± 1,0 % и 69,8 ± 1,1 % соответственно), в то время как в контроле

показатель снизился до 21,8 ± 0,7 %. Высокая стабильность антирадикальной емкости объясняется синергизмом фенольных соединений имбиря с биоактивными пептидами, высвобождающимися при протеолизе казеина в ходе хранения [2;4].

Анализ кислотообразования показал, что значения активной (pH) и титруемой кислотности всех исследуемых образцов на протяжении 21 суток хранения оставались в пределах нормативных требований ГОСТ 31981–2013 (pH 4,0–4,6; титруемая кислотность 75–140 °T) [7]. В контрольном образце наблюдалось более интенсивное постферментативное нарастание кислотности: с 1-х по 21-е сутки показатель pH снизился с 4,56 ± 0,02 до 4,18 ± 0,02 ед. (на 0,38 ед.), а титруемая кислотность выросла с 82 ± 1 до 114 ± 2 °T (прирост составил 32 °T). В образцах с добавлением 2,0 и 3,0 % экстракта имбиря снижение pH протекало плавнее — с 4,52 ± 0,02 до 4,28 ± 0,02 ед. (на 0,24 ед.) и с 4,49 ± 0,02 до 4,30 ± 0,02 ед. (на 0,19 ед.) соответственно, при умеренном росте титруемой кислотности с 85 ± 1 до 106 ± 2 °T и с 87 ± 1 до 104 ± 2 °T (рисунок 1а). Это доказывает, что экстракт имбиря не нарушает физико-химическое равновесие пищевой матрицы, но мягко регулирует метаболическую активность микрофлоры, предотвращая избыточное перекисание и синерезис продукта на поздних сроках хранения [5].

Таблица 2. Динамика физико-химических, антиоксидантных и микробиологических показателей образцов в процессе хранения при (4 ± 2) °C, M ± m (n = 3)

Вариант образца	Срок, сут	Активная кислотность, pH	Титруемая кислотность, °T	Активность DPPH, %	Численность МКМ, КОЕ/г
Контроль (без экстракта)	1	4,56 ± 0,02	82 ± 1	24,5 ± 0,8	$(4,2 \pm 0,3) \times 10^8$
	7	4,44 ± 0,02	91 ± 2	23,6 ± 0,8	$(2,8 \pm 0,2) \times 10^8$
	14	4,31 ± 0,03	103 ± 2	22,7 ± 0,7	$(9,5 \pm 0,4) \times 10^7$
	21	4,18 ± 0,02	114 ± 2	21,8 ± 0,7	$(3,4 \pm 0,3) \times 10^7$
Образец 1 (1,0 % ЭИ)	1	4,54 ± 0,02	84 ± 1	46,2 ± 1,0	$(4,5 \pm 0,3) \times 10^8$
	7	4,43 ± 0,02	92 ± 1	45,8 ± 0,9	$(3,4 \pm 0,2) \times 10^8$
	14	4,33 ± 0,02	101 ± 2	45,1 ± 1,0	$(1,6 \pm 0,2) \times 10^8$
	21	4,24 ± 0,02	109 ± 2	44,5 ± 0,9	$(7,8 \pm 0,4) \times 10^7$
Образец 2 (2,0 % ЭИ)	1	4,52 ± 0,02	85 ± 1	64,8 ± 1,1	$(4,8 \pm 0,3) \times 10^8$
	7	4,42 ± 0,02	93 ± 1	64,1 ± 1,0	$(3,9 \pm 0,3) \times 10^8$
	14	4,35 ± 0,02	100 ± 2	63,3 ± 1,1	$(2,3 \pm 0,2) \times 10^8$
	21	4,28 ± 0,02	106 ± 2	62,4 ± 1,0	$(1,2 \pm 0,1) \times 10^8$
Образец 3 (3,0 % ЭИ)	1	4,49 ± 0,02	87 ± 1	72,4 ± 1,2	$(4,1 \pm 0,3) \times 10^8$
	7	4,41 ± 0,02	94 ± 1	71,7 ± 1,1	$(2,9 \pm 0,2) \times 10^8$
	14	4,36 ± 0,02	99 ± 2	70,8 ± 1,2	$(1,4 \pm 0,2) \times 10^8$
	21	4,30 ± 0,02	104 ± 2	69,8 ± 1,1	$(6,5 \pm 0,4) \times 10^7$
Норма по ГОСТ 31981–2013	**1–21**	**4,00–4,60**	**75–140**	Не нормир.	**Не менее $1,0 \times 10^7$**

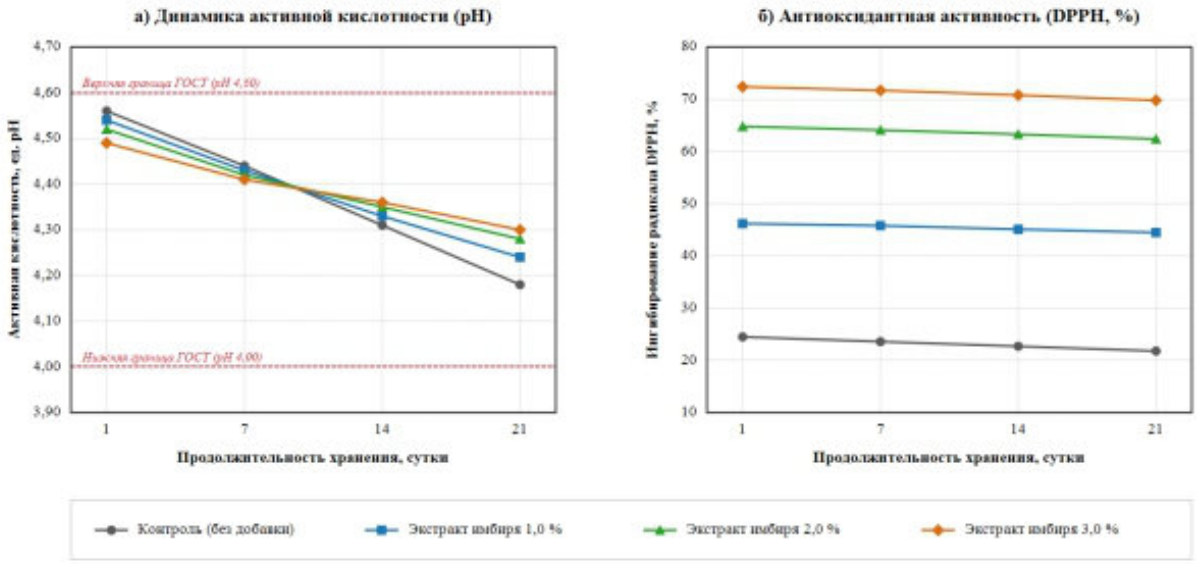


Рисунок 1. Изменение активной кислотности pH (а) и антиоксидантной активности DPPH (б) контрольного и обогащенных образцов в течение 21 суток хранения

Заключение

На основании проведенных экспериментальных исследований антиоксидантной и технологической эффективности биоактивных соединений корневища имбиря (*Zingiber officinale*) в пищевых системах сформулированы следующие выводы:

1. Экстракция корневища имбиря 70 %-м водно-этанольным раствором при гидромодуле 1:10 является технологически оптимальной и обеспечивает максимальный выход сухих веществ (18,2 ± 0,4 %), суммарных полифенолов (24,6 ± 0,5 мг ГКЭ/г), 6-гингерола (8,42 ± 0,18 мг/г) и 6-шогаола (2,15 ± 0,07 мг/г) при антирадикальной активности экстракта 84,6 ± 1,2 % (IC50 = 65,1 ± 1,4 мкг/мл).

2. Внесение экстракта имбиря в дозировках 1,0–3,0 % статистически значимо ($p < 0,05$) повышает антиоксидантную емкость пищевой системы в 1,9–3,0 раза (с 24,5 ± 0,8 % в контроле до 46,2–72,4 % по ингибированию радикала DPPH на 1-е сутки) со стабильным сохранением более 96 % исходной активности к 21-м суткам хранения.

3. При рациональной дозировке экстракта имбиря 2,0 % показатели активной и титруемой кислотности в течение 21 суток холодильного хранения при (4 ± 2) °C плавно изменяются в пределах 4,52–4,28 ед. pH и 85–106 °T, полностью отвечая нормативам ГОСТ 31981–2013 и предотвращая избыточное постферментативное перекисание продукта.

4. Установлена высокая биосовместимость 2,0 % экстракта имбиря с заквасочной микрофлорой: к концу срока хранения (21-е сутки) численность жизнеспособных молочнокислых микроорганизмов составляет (1,2 ± 0,1) × 10^8 КОЕ/г (8,08 lg КОЕ/г), что в 3,5 раза выше показателя контрольного образца и в 12 раз превышает минимальный нормативный порог ГОСТ 31981–2013 (1,0 × 10^7 КОЕ/г).

5. Полученные результаты позволяют рекомендовать водно-этанольный экстракт имбиря (в дозировке 2,0 %) в качестве функционального технологического ингредиента — природного антиоксиданта и биостабилизатора для продления срока годности и повышения биологической ценности пищевых продуктов.

Список литературы

1. Быков, И.И. Экстрагирование биологически активных веществ из Zingiber officinale Roscoe в технологии фитопрепаратов (обзор) / И.И. Быков, Д.В. Компанцев, И.М. Привалов // Химия растительного сырья. – 2006. – № 1. – С. 45–48.
2. Мишарина, Т.А. Оценка антирадикальных свойств компонентов корня имбиря / Т.А. Мишарина, Е.С. Алинкина, Л.Д. Фаткуллина // Химия растительного сырья. – 2013. – № 1. – С. 183–189.
3. Asioli, D. et al. Making sense of “clean label” trends: A review of consumer food choices relevant to clean label dairy products. Food Research International, 99, 58–71. – 2017.
4. I. Felfoul, M. Borchani, O. Samet-Bali [et al.]. Effect of ginger (Zingiber officinalis) addition on fermented bovine milk: rheological properties, sensory attributes and antioxidant potential // Journal of New Sciences. – 2017. – T. 44. – P. 2400–2409.
5. J.L. Sebastián-Nicolás, E. Contreras-López, J.G. Pérez-Flores [et al.]. Improvement of the antioxidant capacity of a yogurt enriched with aqueous ginger extract (Zingiber officinale) // Revista Mexicana de Ingeniería Química. – 2024. – T. 23, № 3. – DOI: 10.24275/rmiq/Bio24254.
6. Majeed, R. Phytochemical and Antioxidant Analysis of Ginger (Zingiber officinale) Ethanolic Extract / R. Majeed, A.K. Mahmood // Advancements in Life Sciences. – 2025. – T. 12, № 2. – P. 331–339. – DOI: 10.62940/als.v12i2.2593.
7. Mao QQ, Xu XY, Cao SY, et al. (2019). Bioactive Compounds and Bioactivities of Ginger (Zingiber officinale Roscoe). Foods. 2019;8(6):185.
8. Sarkar, S. (2019). Potential of kefir as a functional beverage–A review. Br Food J. 2019;121(8): 1735–1749.
9. Sattarova, B.N. & Isakov, M.G. Pros-pects for the use of plant raw materials in food technology. Uzbekistan Food Industry Journal. 4.4. – 2022.
10. Semwal, R.B. et al. Gingerols and shogaols: Important dietary components of ginger. Phytochemistry, 117, 554–568. – 2015.
11. Silva, H.L.A. et al. Effect of ginger extract on the viability of probiotic bacteria in fermented goat milk. J. Dairy Sci. T. 103. – 2020.
12. Singleton, V.L. & Rossi, J.A. Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. American Journal of Enology and Viticulture. T. 16. – 1965.
13. Tursunova, G.N. Biochemical principles of enriching dairy products with phytochemicals. – 2023.
14. Zou Y, Li, Z., & Chen, S. (2020). Chemical compositions and biological activities of ginger: A review. Food Chem. 2020; 312:312.

References

1. Bykov I.I. Extraction of biologically active substances from Zingiber officinale Roscoe in the technology of phytopreparations (a review) / I.I. Bykov, D.V. Kompantsev, I.M. Privalov // Chemistry of Plant Raw Material. – 2006. – No. 1. – P. 45–48.
2. Misharina T.A. Evaluation of the antiradical properties of ginger root components / T.A. Misharina, E.S. Alinkina, L.D. Fatkullina // Chemistry of Plant Raw Material. – 2013. – No. 1. – P. 183–189.
3. Asioli D. et al. Making sense of “clean label” trends: A review of consumer food choices relevant to clean label dairy products. Food Research International, 99, 58–71. – 2017.
4. I. Felfoul, M. Borchani, O. Samet-Bali [et al.]. Effect of ginger (Zingiber officinalis) addition on fermented bovine milk: rheological properties, sensory attributes and antioxidant potential // Journal of New Sciences. – 2017. – Vol. 44. – P. 2400–2409.
5. J.L. Sebastián-Nicolás, E. Contreras-López, J.G. Pérez-Flores [et al.]. Improvement of the antioxidant capacity of a yogurt enriched with aqueous ginger extract (Zingiber officinale) // Revista Mexicana de Ingeniería Química. – 2024. – Vol. 23, No. 3. – DOI: 10.24275/rmiq/Bio24254.
6. Majeed, R. Phytochemical and Antioxidant Analysis of Ginger (Zingiber officinale) Ethanolic Extract / R. Majeed, A.K. Mahmood // Advancements in Life Sciences. – 2025. – Vol. 12, No. 2. – P. 331–339. – DOI: 10.62940/als.v12i2.2593.
7. Mao QQ, Xu XY, Cao SY, et al. (2019). Bioactive Compounds and Bioactivities of Ginger (Zingiber officinale Roscoe). Foods. 2019;8(6):185.
8. Sarkar, S. (2019). Potential of kefir as a functional beverage–A review. Br Food J. 2019;121(8): 1735–1749.
9. Sattarova B.N. & Isakov M.G. Pros-pects for the use of plant raw materials in food technology. Uzbekistan Food Industry Journal. 4.4. – 2022.
10. Semwal R.B. et al. Gingerols and shogaols: Important dietary components of ginger. Phytochemistry, 117, 554–568. – 2015.
11. Silva H.L.A. et al. Effect of ginger extract on the viability of probiotic bacteria in fermented goat milk. J. Dairy Sci. T. 103. – 2020.
12. Singleton V.L. & Rossi J.A. Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. American Journal of Enology and Viticulture. T. 16. – 1965.
13. Tursunova G.N. Biochemical principles of enriching dairy products with phytochemicals. – 2023.
14. Zou Y, Li, Z., & Chen, S. (2020). Chemical compositions and biological activities of ginger: A review. Food Chem. 2020;312:312.

Статья поступила в редакцию: 06.11.2026
Статья принята к публикации: 17.11.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 664.854:66.047

DOI: 10.32743/UniTech.2026.152.11.23712

Применение электрических полей для интенсификации сушки плодов: от электрогидродинамической сушки и импульсной обработки к обработке полем умеренной напряжённости

Гафуров Карим Хакимович
д-р техн. наук, проф.
Бухарский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Бухара
ORCID: 0000-0001-6202-7880
E-mail: kgafurov@yahoo.com

Рахмонов Шермурод Бахтиёрович
базовый докторант
стажёр-преподаватель, кафедра «Технологические машины и оборудование», Бухарский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Бухара
ORCID: 0009-0003-5850-0593
E-mail: raxmonovsher9@gmail.com

Файзиев Элбек Улугбекович
базовый докторант
кафедра «Технологические машины и оборудование», Бухарский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Бухара

Electric fields for intensifying fruit drying: from electrohydrodynamic drying and pulsed electric field pretreatment to moderate electric field treatment

Gafurov Karim Khakimovich
doctor of Technical Sciences (DSc)
professor, Bukhara State Technical University
Republic of Uzbekistan, Bukhara

Rakhmonov Shermurod Bakhtiyorovich
PhD student
Intern Teacher, Department of Technological Machines and Equipment, Bukhara State Technical University
Republic of Uzbekistan, Bukhara

Библиографическое описание: Гафуров К.Х., Рахмонов Ш.Б., Файзиев Э.У. Применение электрических полей для интенсификации сушки плодов: от электрогидродинамической сушки и импульсной обработки к обработке полем умеренной напряжённости // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23712

Fayziev Elbek Ulugbekovich
PhD student
Department of Technological Machines and Equipment, Bukhara State Technical University
Republic of Uzbekistan, Bukhara

Аннотация

Традиционная тепловая сушка плодов отличается высокими энергозатратами и потерями пищевой ценности. В аналитическом обзоре рассмотрены электрогидродинамическая (ЭГД) сушка, предварительная обработка импульсным электрическим полем (ИЭП) и обработка полем умеренной напряжённости (MEF), а также проведено их разграничение с омическим нагревом. Описаны физические механизмы — генерация ионного ветра, разрушение пограничного слоя и электропорация клеточных мембран — и обобщены опубликованные данные о кинетике сушки, энергозатратах и качестве продукта. Удельные энергозатраты ЭГД-сушки ломтиков яблок, отнесённые к 1 кг испарённой влаги и учитывающие только высоковольтный источник, в 10–12 раз ниже, чем при конвективной сушке. ИЭП сокращает продолжительность сушки яблок на 6–22 %, пастернака — до 28 %. Влияние обеих технологий на биологически активные вещества неоднозначно и зависит от удельной энергии обработки и вида сырья. Основные ограничения — лабораторный масштаб исследований, несопоставимость методик оценки энергозатрат и недостаточная изученность механизмов переноса. В заключение обоснована перспективность MEF-обработки (0,1–1 кВ/см, 50 Гц – кГц) перед сушкой яблок, влияние которой на кинетику сушки систематически не изучено.

Abstract

Conventional thermal drying of fruits is energy-intensive and causes losses of nutritional value. This review considers electrohydrodynamic (EHD) drying, pulsed electric field (PEF) pretreatment and moderate electric field (MEF) treatment, distinguishing them from ohmic heating. Mechanisms — ionic wind generation, boundary layer disruption and membrane electroporation — are described, and data on drying kinetics, energy consumption and product quality are summarised. The energy consumption of EHD drying of apples per kilogram of evaporated water (high-voltage supply only) is 10–12 times lower than that of hot-air drying. PEF shortens drying time of apples by 6–22 % and of parsnip by up to 28 %. Effects on bioactive compounds depend on treatment energy and raw material. Limitations include the laboratory scale, incomparable methods of energy assessment and incomplete understanding of transfer mechanisms. The potential of MEF pretreatment of apples (0.1–1 kV/cm, 50 Hz – kHz), whose effect on drying kinetics remains poorly studied, is substantiated.

Ключевые слова: сушка плодов, электрогидродинамическая сушка, ионный ветер, импульсное электрическое поле, электрическое поле умеренной напряжённости, омический нагрев, электропорация, энергоэффективность.

Keywords: fruit drying, electrohydrodynamic drying, ionic wind, pulsed electric field, moderate electric field, ohmic heating, electroporation, energy efficiency.

Финансирование: исследование выполнено без внешнего финансирования.

Funding: the study was conducted without external funding.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

Благодарности: При подготовке рукописи использован Claude (Anthropic) для перевода текста с английского языка на русский, языковой редакции, оформления статьи в соответствии с требованиями журнала, а также для построения схем на рисунках 1 и 2 по описанию авторов; содержание рисунков проверено авторами. Инструмент не использовался для получения исследовательских результатов.

Acknowledgements: Claude (Anthropic) was used to translate the manuscript from English into Russian, for language editing, for formatting according to the journal requirements and for drawing the schematics in Figures 1 and 2 based on the authors' description; the content of the figures was verified by the authors. The tool was not used to produce research findings.

Введение

Традиционная тепловая сушка плодов требует длительного времени и значительных энергозатрат и вызывает изменения цвета, текстуры и содержания витаминов [6]. Поэтому исследуются электротехнологии, ускоряющие сушку при минимальном нагреве: электрогидродинамическая (ЭГД) сушка [4], предварительная обработка импульсным электрическим полем (ИЭП) [20] и полем умеренной напряжённости (moderate electric field, MEF) [3]; ранее авторами изучалось применение электромагнитных полей при сушке абрикосов и персиков [1, 21, 22]. Цель статьи — обобщить физические основы и данные об эффективности этих технологий, разграничить MEF, ИЭП и омический нагрев и определить перспективные направления развития.

Методика обзора

Обзор выполнен как аналитический (несистематический). Публикации за 1999–2025 гг. искали в Google Scholar, PubMed Central, DOAJ и на сайтах издательств (Elsevier, MDPI, Springer, Wiley) по запросам «electrohydrodynamic drying», «pulsed electric field» AND «drying», («moderate electric field» OR «ohmic») AND («drying» OR «diffusion») в сочетании с «apple», «fruit», «vegetable». Включали работы в рецензируемых изданиях с количественными данными о кинетике сушки, энергозатратах, диффузии или качестве растительного сырья; исключали работы по непищевым материалам, распылительной сушке и без описания параметров обработки. Числовые данные сверяли с полными текстами или аннотациями. Включены 21 внешний источник и три работы авторов.

Механизмы действия электрических полей

Электрогидродинамическая сушка. При подаче высокого напряжения на электрод-эмиттер возникает коронный разряд; ускоренные полем ионы увлекают нейтральные молекулы воздуха, формируя направленный к продукту ионный ветер (рис. 1) [14]. Он разрушает насыщенный влагой пограничный слой и снижает сопротивление массопереносу

[15]. По данным моделирования, около 93 % потока влаги обеспечивается конвекцией ионного ветра, а электропорация мембран повышает долю трансмембранного потока примерно до 6,5 % [8].

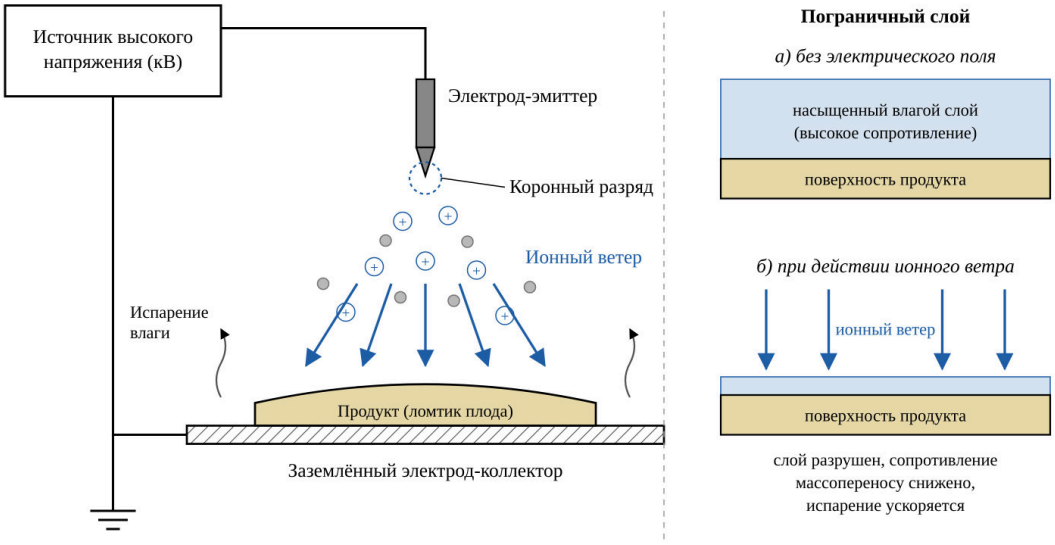


Рисунок 1. Принципиальная схема электрогидродинамической сушки

Обработка импульсным электрическим полем. Микросекундные высоковольтные импульсы вызывают электропорацию клеточных мембран, что облегчает выход влаги из клеток (рис. 2) [20]. ИЭП применяется как предварительная обработка; в рассмотренных работах напряжённость составляла 0,9–2,8 кВ/см, удельная энергия — 1–65 кДж/кг [2, 12, 16, 24].

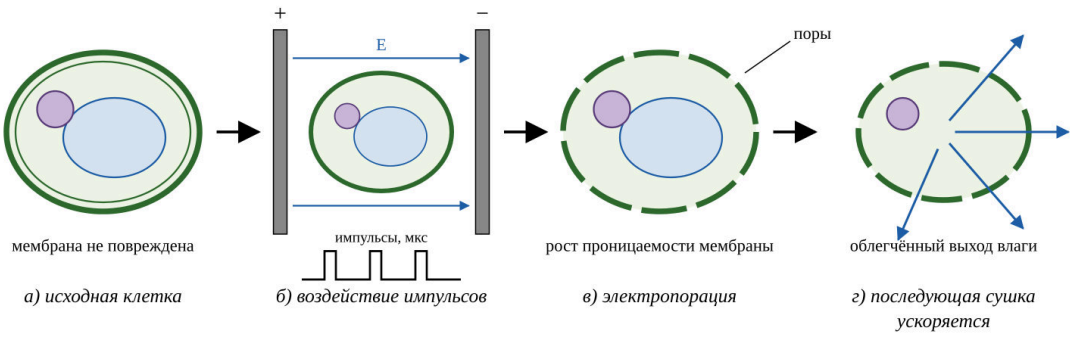


Рисунок 2. Механизм электропорации при обработке импульсным электрическим полем

Поле умеренной напряжённости и омический нагрев. При MEF-обработке и омическом нагреве (ОН) через продукт, находящийся между электродами непосредственно или в проводящей среде, протекает переменный ток, и джоулев нагрев присущ обеим технологиям [3]. Их условно разграничивают по напряжённости поля: ОН — менее 100 В/см, MEF — 100–1000 В/см, свыше 1000 В/см — ИЭП [3], а также по цели: при ОН — нагрев продукта, при MEF — повышение проницаемости мембран при умеренной температуре

[3, 9]. Для MEF типичны частота от 50 Гц до килогерц, синусоидальный, прямоугольный или пилообразный сигнал и длительность от секунд до минут [3, 10, 13]. Граница не строгая: MEF применяют и импульсами по 100 мс [10]. Сравнение технологий приведено в табл. 3.

Эффективность и влияние на качество продукта

Опубликованные данные обобщены в табл. 1. ЭГД-сушка уменьшает усадку и лучше сохраняет цвет и пищевую ценность [4, 17]; ИЭП-обработка сокращает продолжительность сушки и формирует пористую структуру [16], в том числе при сублимационной сушке яблок [18].

Таблица 1. Опубликованные данные об эффективности ЭГД-сушки, ИЭП- и MEF-обработки

Продукт	Обработка (параметры)	Условия сушки	Показатель (ед. изм.): результат	Ссылка
Яблоко, ломтики 1–3 мм	ЭГД: +20 кВ, «игла – сетка», 5 кВ/см	20 °C; контроль — конвективная, 40 °C	Энергозатраты (кДж/кг испарённой влаги): 391–674, в 10–12 раз ниже; ΔE: 1,53 против 6,78; фенолы (мг ГАЭ/г с. в.): 1,95 против 1,40	[19]
Морковь, 2 мм	ЭГД: 20–44 кВ переменного тока	26 °C; контроль — без поля	Каротиноиды: в 1,58–2 раза выше контроля; фенолы и витамин A: ниже контроля	[23]
Яблоко	ИЭП: 1 кВ/см; 1–6 кДж/кг	Вакуумная, 4 кПа, 40–70 °C	Продолжительность сушки (%): ↓ 6–22; фенолы (%): ↓ 12–40; антиоксидантная активность (%): ↓ 23–81	[16]
Пастернак, морковь	ИЭП: 0,9 кВ/см, 20 мкс; ≈ 65 кДж/кг	Конвективная, 50–70 °C, 1 м/с	Продолжительность сушки (%): ↓ до 28 (пастернак, 70 °C) и до 21 (морковь, 60 °C)	[2]
Манго	ИЭП: 1,07 кВ/см; 1 и 3 кДж/кг	Конвективная, 70 °C; вакуумная	Сохранность фенолов (% к свежему): выше контроля до 70; регидратация (%): ↓ 16–21; антиоксидантная активность ↓ при 3 кДж/кг	[12]
Шпинат	ИЭП: 2,8 кВ/см; 27,1 кДж/кг	Конвективная	Скорость сушки: выше на начальной стадии; аскорбиновая кислота и цвет: потери меньше, чем после бланширования	[24]
Яблоко, 3 мм	MEF: 0,1–0,2 кВ/см, 50 Гц, 1 мин	Конвективная, 75 °C, 1,2 м/с	ГМФ (%): ↓ 10–23; витамин C: при синусоидальном сигнале на ≈ 27 % выше, чем при прямоугольном; кинетика не измерялась	[10]

Кратности снижения энергозатрат ЭГД-сушки в литературе получены разными способами (табл. 2). Значение 10–12 раз [19] измерено на 1 кг испарённой влаги с учётом только высоковольтного источника, без вентилятора, относительно конвективной сушки при 40 °C; значение 20–25 раз [15] — оценка без приведённой методики. Основным в обзоре принято измеренное значение. Поскольку оно в 3,6–6,3 раза ниже теплоты парообразования воды, теплота испарения поступает из окружающего воздуха и в показатель не входит; для сравнения с промышленными сушилками нужно учитывать вентиляторы и потери в источнике питания.

Таблица 2. Сопоставление данных об удельных энергозатратах ЭГД-сушки

Источник	Показатель и учитываемая мощность	ЭГД, кДж/кг	База сравнения	Кратность
[19], яблоко	U·I/(dm/dt) на 1 кг испарённой влаги; только высоковольтный источник, без вентилятора (1,5 кВт)	391–674 (измерено)	Конвективная сушка, 40 °C	10–12 (выводы); 12–20 (результаты)
[15], оценка	Методика и учитываемая мощность не указаны	450–750 → 3000–3500 к концу сушки	«Эквивалентная тепловая сушка»	20–25
Расчёт авторов	Теплота парообразования воды при 20 °C r = 2454 кДж/кг; r/SEC	391–674	r	3,6–6,3

Влияние на биологически активные вещества неоднозначно: при ЭГД-сушке яблок лучше сохраняются цвет и фенолы [19], у моркови растёт сохранность каротиноидов, но снижается содержание фенолов и витамина А [23]; после ИЭП сохранность фенолов в манго выше [12], а в яблоках при вакуумной сушке ниже [16]. Это требует подбора параметров для каждого вида сырья [12, 20].

Обсуждение и перспективы

Основное ограничение — лабораторный масштаб: масштабирование ЭГД-сушки требует новых конструкций сушилок и электродов [7, 17], механизмы внутреннего массопереноса изучены не полностью [7]. Перспективно сочетание ЭГД с другими способами сушки [15], а ИЭП — с вакуумной и сублимационной сушкой [16, 18].

Применительно к сушке менее всего изучена MEF-обработка: такие поля использовались главным образом для инактивации микроорганизмов и экстракции сока [10]. Усиление диффузии при MEF зависит от частоты и напряжённости поля [11], а сочетание импульсов умеренной напряжённости с нагревом на 10–15 °C повышает коэффициент диффузии из ломтиков яблок [9]; омическая предобработка ускоряла сушку ямса, причём сигнал 4 Гц был эффективнее 60 Гц [13]. В единственной найденной работе по MEF перед сушкой яблок (0,1–0,2 кВ/см, 50 Гц) образование ГМФ снизилось на 10–23 %, а синусоидальный сигнал сохранял на 27 % больше витамина С, чем прямоугольный; кинетика сушки при этом не измерялась [10].

Электроплазмолиз при напряжённости ниже 0,3 кВ/см показан на измельчённой яблочной ткани перед прессованием сока [5]; этот порог зависит от ткани, температуры, частоты, формы сигнала и длительности обработки [9, 11, 13] и для ломтиков перед сушкой должен определяться экспериментально, например по индексу разрушения клеток [16]. MEF допускает простые источники промышленной частоты, а частота и форма сигнала позволяют управлять степенью электропорации, однако переносить результаты ИЭП на MEF без проверки некорректно (табл. 3). Систематическое исследование MEF при сушке яблок — предмет дальнейших работ авторов.

Таблица 3. Сравнительная характеристика ЭГД-сушки, ИЭП- и MEF-обработки

Показатель	ЭГД	ИЭП	MEF
Стадия	В процессе сушки	Предобработка	Предобработка

Показатель	ЭГД	ИЭП	MEF
Механизм	Ионный ветер, разрушение пограничного слоя [8]	Электропорация мембран [20]	Электропорация при умеренном джоулевом нагреве [3, 9]
Типичные параметры	≈ 5 кВ/см, 20–44 кВ, постоянный или переменный ток; часы; 20–26 °C; эмиттер – сетка, без контакта с продуктом [19, 23]	0,9–2,8 кВ/см; импульсы ≈ 20 мкс; суммарно доли секунды; электроды через проводящую среду [2, 12, 16, 24]	0,1–1 кВ/см; 50 Гц – кГц, синус, меандр, пила; секунды – минуты; нагрев на 10–15 °C; плоские электроды в воде [3, 9, 10, 13]
Энергопотребление	391–674 кДж/кг испарённой влаги (только источник) [19]	1–65 кДж/кг продукта [2, 12, 16, 24]	Не приводится [10]
Масштабируемость и ограничения	Новые конструкции сушилок и электродов [7, 17]; спад эффективности при большой загрузке [19]	Импульсный высоковольтный генератор; риск «переобработки» [12, 16]	Простой источник 50 Гц; нет данных о кинетике сушки яблок [10]
Влияние на качество	Яблоко: цвет, фенолы ↑ [19]; морковь: каротиноиды ↑, витамин А ↓ [23]	Яблоко: фенолы ↓ [16]; манго: фенолы ↑ [12]	Яблоко: ГМФ ↓, витамин С зависит от сигнала [10]

Заключение

ЭГД-сушка ускоряет массообмен при температуре, близкой к окружающей; её электрические энергозатраты на 1 кг испарённой влаги в 10–12 раз ниже, чем при конвективной сушке, но методики оценки требуют унификации. ИЭП сокращает продолжительность сушки на 6–28 %. Влияние обеих технологий на биологически активные вещества зависит от параметров и вида сырья. MEF отличается от ИЭП меньшей напряжённостью и большей длительностью воздействия, от омического нагрева — целью; данных о её влиянии на кинетику сушки яблок практически нет. Приоритетны оптимизация параметров, стандартизация оценки энергозатрат, масштабирование и систематическое исследование MEF-обработки яблок.

Список литературы

1. Гафуров К., Рахмонов Ш. Механизм влияния низкочастотного электрического поля на процесс сушки плодов (обзор) // Development of Science and Technology. – 2025. – № 6. – С. 157–160.
2. Alam M.R., Lyng J.G., Frontuto D., Marra F., Cinquanta L. Effect of pulsed electric field pretreatment on drying kinetics, color, and texture of parsnip and carrot // Journal of Food Science. – 2018. – Т. 83, № 8. – P. 2159–2166. – DOI: 10.1111/1750–3841.14216.
3. Astráin-Redín L., Ospina S., Cebrián G. Álvarez-Lanzarote I. Ohmic heating technology for food applications, from ohmic systems to moderate electric fields and pulsed electric fields // Food Engineering Reviews. – 2024. – Т. 16, № 2. – P. 225–251. – DOI: 10.1007/s12393-024-09368-4.
4. Bashkir I., Defraeye T., Kudra T., Martynenko A. Electrohydrodynamic drying of plant-based foods and food model systems // Food Engineering Reviews. – 2020. – Т. 12, № 4. – P. 473–497. – DOI: 10.1007/s12393-020-09229-w.

5. Bazhal M., Vorobiev E. Electrical treatment of apple cossettes for intensifying juice pressing // Journal of the Science of Food and Agriculture. – 2000. – T. 80, № 11. – P. 1668–1674. – DOI: 10.1002/1097–0010(20000901)80:11<1668::AID-JSFA692>3.0.CO;2–7.
6. Deng L.-Z., Mujumdar A.S., Zhang Q., Yang X.-H., Wang J., Zheng Z.-A., Gao Z.-J., Xiao H.-W. Chemical and physical pretreatments of fruits and vegetables: Effects on drying characteristics and quality attributes – a comprehensive review // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. – 2019. – T. 59, № 9. – P. 1408–1432. – DOI: 10.1080/10408398.2017.1409192.
7. Ham J.C.A., Alawi A., Rizki Z., Boom R.M., Garbin V., Padding J.T., Schutyser M.A.I. A multi-scale analysis on electrohydrodynamic drying technology for bio-based & food products // Trends in Food Science & Technology. – 2024. – T. 151. – Art. 104634. – DOI: 10.1016/j.tifs.2024.104634.
8. Iranshahi K., Onwude D.I., Martynenko A., Defraeye T. Dehydration mechanisms in electrohydrodynamic drying of plant-based foods // Food and Bioproducts Processing. – 2022. – T. 131. – P. 202–216. – DOI: 10.1016/j.fbp.2021.11.009.
9. Jemai A.B., Vorobiev E. Effect of moderate electric field pulses on the diffusion coefficient of soluble substances from apple slices // International Journal of Food Science and Technology. – 2002. – T. 37, № 1. – P. 73–86. – DOI: 10.1046/j.1365–2621.2002.00516.x.
10. Kalkavan D., Sahin Yesilcubuk N. Effects of moderate electric field pretreatment on the efficiency and nutritional quality of hot air-dried apple slices // Foods. – 2025. – T. 14, № 13. – Art. 2160. – DOI: 10.3390/foods14132160.
11. Kulshrestha S., Sastry S. Frequency and voltage effects on enhanced diffusion during moderate electric field (MEF) treatment // Innovative Food Science & Emerging Technologies. – 2003. – T. 4, № 2. – P. 189–194. – DOI: 10.1016/S1466-8564(03)00003-1.
12. Lammerskitten A., Shorstkii I., Parniakov O., Mykhailyk V., Toepfl S., Rybak K., Dadan M., Nowacka M., Wiktor A. The effect of different methods of mango drying assisted by a pulsed electric field on chemical and physical properties // Journal of Food Processing and Preservation. – 2020. – T. 44, № 12. – DOI: 10.1111/jfpp.14973.
13. Lima M., Sastry S.K. The effects of ohmic heating frequency on hot-air drying rate and juice yield // Journal of Food Engineering. – 1999. – T. 41, № 2. – P. 115–119. – DOI: 10.1016/S0260-8774(99)00080-1.
14. Martynenko A., Kudra T. Electrically-induced transport phenomena in EHD drying – A review // Trends in Food Science & Technology. – 2016. – T. 54. – P. 63–73. – DOI: 10.1016/j.tifs.2016.05.019.
15. Martynenko A., Kudra T. Electrohydrodynamic drying technology for heat sensitive foods // Chemical Engineering Transactions. – 2023. – T. 102. – P. 259–264. – DOI: 10.3303/CET23102044.
16. Matys A., Witrowa-Rajchert D., Parniakov O., Wiktor A. Application of pulsed electric field prior to vacuum drying: Effect on drying time and quality of apple tissue // Research in Agricultural Engineering. – 2022. – T. 68, № 2. – P. 93–101. – DOI: 10.17221/93/2021-RAE.

17. Onwude D.I., Iranshahi K., Martynenko A., Defraeye T. Electrohydrodynamic drying: Can we scale-up the technology to make dried fruits and vegetables more nutritious and appealing? // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. – 2021. – T. 20, № 5. – P. 5283–5313. – DOI: 10.1111/1541–4337.12799.
18. Parniakov O., Bals O., Lebovka N., Vorobiev E. Pulsed electric field assisted vacuum freeze-drying of apple tissue // Innovative Food Science & Emerging Technologies. – 2016. – T. 35. – P. 52–57. – DOI: 10.1016/j.ifset.2016.04.002.
19. Paul A., Martynenko A. The effect of material thickness, load density, external airflow, and relative humidity on the drying efficiency and quality of EHD-dried apples // Foods. – 2022. – T. 11, № 18. – Art. 2765. – DOI: 10.3390/foods11182765.
20. Punthi F., Yudhistira B., Gavahian M., Chang C.-K., Cheng K.-C., Hou C.-Y., Hsieh C.-W. Pulsed electric field-assisted drying: A review of its underlying mechanisms, applications, and role in fresh produce plant-based food preservation // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. – 2022. – T. 21, № 6. – P. 5109–5130. – DOI: 10.1111/1541–4337.13052.
21. Rakhmonov Sh., Gafurov K., Rustamov E. Efficacy of low-frequency electromagnetic fields (LF-EMF) in drying apricots and peaches: A comparative analysis of quality and energy // Journal of Multidisciplinary Sciences and Innovations. – 2025. – T. 4, № 11. – P. 1322–1327.
22. Rakhmonov Sh., Gafurov K., Rustamov E. Shaftoli va o'rik navlarining quritishga mosligi bo'yicha biokimyoviy tahlili va xalqaro talablar asosidagi baholanishi // Development of Science. – 2025. – T. 2, № 1. – P. 73–83.
23. Wang Y., Ding C. Effect of electrohydrodynamic drying on drying characteristics and physicochemical properties of carrot // Foods. – 2023. – T. 12, № 23. – Art. 4228. – DOI: 10.3390/foods12234228.
24. Yamakage K., Yamada T., Takahashi K., Takaki K., Komuro M., Sasaki K., Aoki H., Kamagata J., Koide S., Orikasa T. Impact of pre-treatment with pulsed electric field on drying rate and changes in spinach quality during hot air drying // Innovative Food Science & Emerging Technologies. – 2021. – T. 68. – Art. 102615. – DOI: 10.1016/j.ifset.2021.102615.

References

1. Gafurov K., Rakhmonov Sh. [Mechanism of the influence of a low-frequency electric field on the fruit drying process (review)] // Development of Science and Technology. – 2025. – No. 6. – P. 157–160. (In Russ.).
2. Alam M.R., Lyng J.G., Frontuto D., Marra F., Cinquanta L. Effect of pulsed electric field pretreatment on drying kinetics, color, and texture of parsnip and carrot // Journal of Food Science. – 2018. – Vol. 83, No. 8. – P. 2159–2166. – DOI: 10.1111/1750–3841.14216.
3. Astráin-Redín L., Ospina S., Cebrián G. Álvarez-Lanzarote I. Ohmic heating technology for food applications, from ohmic systems to moderate electric fields and pulsed electric fields // Food Engineering Reviews. – 2024. – Vol. 16, No. 2. – P. 225–251. – DOI: 10.1007/s12393-024-09368-4.

4. Bashkir I., Defraeye T., Kudra T., Martynenko A. Electrohydrodynamic drying of plant-based foods and food model systems // Food Engineering Reviews. – 2020. – Vol. 12, No. 4. – P. 473–497. – DOI: 10.1007/s12393-020-09229-w.
5. Bazhal M., Vorobiev E. Electrical treatment of apple cossettes for intensifying juice pressing // Journal of the Science of Food and Agriculture. – 2000. – Vol. 80, No. 11. – P. 1668–1674. – DOI: 10.1002/1097–0010(20000901)80:11<1668::AID-JSFA692>3.0.CO;2–7.
6. Deng L.-Z., Mujumdar A.S., Zhang Q., Yang X.-H., Wang J., Zheng Z.-A., Gao Z.-J., Xiao H.-W. Chemical and physical pretreatments of fruits and vegetables: Effects on drying characteristics and quality attributes – a comprehensive review // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. – 2019. – Vol. 59, No. 9. – P. 1408–1432. – DOI: 10.1080/10408398.2017.1409192.
7. Ham J.C.A., Alawi A., Rizki Z., Boom R.M., Garbin V., Padding J.T., Schutyser M.A.I. A multi-scale analysis on electrohydrodynamic drying technology for bio-based & food products // Trends in Food Science & Technology. – 2024. – Vol. 151. – Art. 104634. – DOI: 10.1016/j.tifs.2024.104634.
8. Iranshahi K., Onwude D.I., Martynenko A., Defraeye T. Dehydration mechanisms in electrohydrodynamic drying of plant-based foods // Food and Bioproducts Processing. – 2022. – Vol. 131. – P. 202–216. – DOI: 10.1016/j.fbp.2021.11.009.
9. Jemai A.B., Vorobiev E. Effect of moderate electric field pulses on the diffusion coefficient of soluble substances from apple slices // International Journal of Food Science and Technology. – 2002. – Vol. 37, No. 1. – P. 73–86. – DOI: 10.1046/j.1365–2621.2002.00516.x.
10. Kalkavan D., Sahin Yesilcubuk N. Effects of moderate electric field pretreatment on the efficiency and nutritional quality of hot air-dried apple slices // Foods. – 2025. – Vol. 14, No. 13. – Art. 2160. – DOI: 10.3390/foods14132160.
11. Kulshrestha S., Sastry S. Frequency and voltage effects on enhanced diffusion during moderate electric field (MEF) treatment // Innovative Food Science & Emerging Technologies. – 2003. – Vol. 4, No. 2. – P. 189–194. – DOI: 10.1016/S1466-8564(03)00003-1.
12. Lammerskitten A., Shorstkii I., Parniakov O., Mykhailyk V., Toepfl S., Rybak K., Dadan M., Nowacka M., Wiktor A. The effect of different methods of mango drying assisted by a pulsed electric field on chemical and physical properties // Journal of Food Processing and Preservation. – 2020. – Vol. 44, No. 12. – DOI: 10.1111/jfpp.14973.
13. Lima M., Sastry S.K. The effects of ohmic heating frequency on hot-air drying rate and juice yield // Journal of Food Engineering. – 1999. – Vol. 41, No. 2. – P. 115–119. – DOI: 10.1016/S0260-8774(99)00080-1.
14. Martynenko A., Kudra T. Electrically-induced transport phenomena in EHD drying – A review // Trends in Food Science & Technology. – 2016. – Vol. 54. – P. 63–73. – DOI: 10.1016/j.tifs.2016.05.019.
15. Martynenko A., Kudra T. Electrohydrodynamic drying technology for heat sensitive foods // Chemical Engineering Transactions. – 2023. – Vol. 102. – P. 259–264. – DOI: 10.3303/CET23102044.

16. Matys A., Witrowa-Rajchert D., Parniakov O., Wiktor A. Application of pulsed electric field prior to vacuum drying: Effect on drying time and quality of apple tissue // Research in Agricultural Engineering. – 2022. – Vol. 68, No. 2. – P. 93–101. – DOI: 10.17221/93/2021-RAE.
17. Onwude D.I., Iranshahi K., Martynenko A., Defraeye T. Electrohydrodynamic drying: Can we scale-up the technology to make dried fruits and vegetables more nutritious and appealing? // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. – 2021. – Vol. 20, No. 5. – P. 5283–5313. – DOI: 10.1111/1541–4337.12799.
18. Parniakov O., Bals O., Lebovka N., Vorobiev E. Pulsed electric field assisted vacuum freeze-drying of apple tissue // Innovative Food Science & Emerging Technologies. – 2016. – Vol. 35. – P. 52–57. – DOI: 10.1016/j.ifset.2016.04.002.
19. Paul A., Martynenko A. The effect of material thickness, load density, external airflow, and relative humidity on the drying efficiency and quality of EHD-dried apples // Foods. – 2022. – Vol. 11, No. 18. – Art. 2765. – DOI: 10.3390/foods11182765.
20. Punthi F., Yudhistira B., Gavahian M., Chang C.-K., Cheng K.-C., Hou C.-Y., Hsieh C.-W. Pulsed electric field-assisted drying: A review of its underlying mechanisms, applications, and role in fresh produce plant-based food preservation // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. – 2022. – Vol. 21, No. 6. – P. 5109–5130. – DOI: 10.1111/1541–4337.13052.
21. Rakhmonov Sh., Gafurov K., Rustamov E. Efficacy of low-frequency electromagnetic fields (LF-EMF) in drying apricots and peaches: A comparative analysis of quality and energy // Journal of Multidisciplinary Sciences and Innovations. – 2025. – Vol. 4, No. 11. – P. 1322–1327.
22. Rakhmonov Sh., Gafurov K., Rustamov E. [Biochemical analysis of peach and apricot varieties for drying suitability and their assessment based on international requirements] // Development of Science. – 2025. – Vol. 2, No. 1. – P. 73–83.
23. Wang Y., Ding C. Effect of electrohydrodynamic drying on drying characteristics and physicochemical properties of carrot // Foods. – 2023. – Vol. 12, No. 23. – Art. 4228. – DOI: 10.3390/foods12234228.
24. Yamakage K., Yamada T., Takahashi K., Takaki K., Komuro M., Sasaki K., Aoki H., Kamagata J., Koide S., Orikasa T. Impact of pre-treatment with pulsed electric field on drying rate and changes in spinach quality during hot air drying // Innovative Food Science & Emerging Technologies. – 2021. – Vol. 68. – Art. 102615. – DOI: 10.1016/j.ifset.2021.102615.

Статья поступила в редакцию: 23.10.2026
Статья принята к публикации: 28.10.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 577.21

Фотохимические механизмы повреждения ДНК под действием ультрафиолетового излучения и клеточные системы её репарации

Имамова Дилфуза Аноровна
канд. биол. наук, доц.
кафедры химии, Джизакский государственный педагогический университет
Республика Узбекистан, г. Джизак
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9403-7538
E-mail: dilfuza.imomova@inbox.ru
Бакахонов Анвар Акабирович[1]
преподаватель
Джизакский государственный педагогический университет
Республика Узбекистан, г. Джизак
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0284-6192
Умирова Нилуфар Оманбаевна[2]
PhD, доц.
Гулистанский государственный университет
Республика Узбекистан, г. Гулистан
Лапасова Феруза Абдуллаевна[2]
PhD, доц.
Гулистанский государственный университет
Республика Узбекистан, г. Гулистан

Photochemical mechanisms of ultraviolet-induced DNA damage and cellular repair systems

Imamova Dilfuza Anorovna
candidate of Biological Sciences, Associate Professor
Department of Chemistry, Jizzakh State Pedagogical University
Republic of Uzbekistan, Jizzakh
Bakakhonov Anvar Akabirovich
lecturer
Jizzakh State Pedagogical University
Republic of Uzbekistan, Jizzakh
Umirova Nilufar Omanbaevna
PhD, Associate Professor
Gulistan State University
Republic of Uzbekistan, Gulistan
Lapasova Feruza Abdullaevna
PhD, Associate Professor
Gulistan State University
Republic of Uzbekistan, Gulistan

Библиографическое описание: Фотохимические механизмы повреждения ДНК под действием ультрафиолетового излучения и клеточные системы её репарации // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Имамова Д.А. [и др.]. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23685

Аннотация

Цель работы - систематизировать механизмы ультрафиолетового повреждения ДНК и определить правила их сопоставления с клеточными путями репарации. Применены анализ научных публикаций и экспертная организация материала посредством метода шести шляп де Боно. Метод адаптирован для последовательного разграничения установленных фактов, предположений, ограничений, направлений проверки и итогового заключения. Рассмотрены прямое образование пиримидиновых фотопродуктов, окислительные повреждения и различия между фотореактивацией, эксцизионной репарацией нуклеотидов и эксцизионной репарацией оснований. Результатом является схема выбора аналитического признака в зависимости от типа предполагаемого повреждения. Показано, почему уменьшение общего сигнала повреждения нельзя автоматически истолковывать как восстановление исходной последовательности ДНК. Выделены источники ошибок, связанные с гибелью клеток, их делением и различной специфичностью аналитических методов. Обоснована необходимость совместного учёта дозы излучения, времени наблюдения и жизнеспособности клеточной популяции. Собственные опыты с культурами клеток, животными или участием человека в работе не описываются. Практическое назначение разработки состоит в совершенствовании научно-методического разбора фотобиологических исследований на университетских кафедрах Узбекистана. Предложенная организация обсуждения позволяет отделять доказанный механизм от привлекательной гипотезы и точнее определять границы биологического вывода.

Abstract

The study systematises mechanisms of ultraviolet-induced DNA damage and establishes principles for comparing them with cellular repair pathways. Scientific publications were analysed using an expert discussion framework adapted from de Bono’s Six Thinking Hats. The framework separates established facts, assumptions, limitations, verification strategies and conclusions. Direct formation of pyrimidine photoproducts, oxidative lesions, photoreactivation, nucleotide excision repair and base excision repair are considered. The principal outcome is a scheme linking the suspected lesion type to an appropriate analytical endpoint. A reduction in an aggregate damage signal cannot automatically be interpreted as restoration of the original DNA sequence. Sources of error include cell death, population division and differences in assay specificity. Radiation dose, observation time and cell viability must therefore be considered together. No original experiments involving cell cultures, animals or human participants are reported. The framework is intended for methodological assessment of photobiological studies in university departments in Uzbekistan. Its practical contribution is to distinguish demonstrated mechanisms from plausible hypotheses and to define the limits of biological inference.

Ключевые слова: ультрафиолет, ДНК, фотопродукты, репарация, фотолиаза, шесть шляп де Боно.

Keywords: ultraviolet radiation, DNA, photoproducts, DNA repair, photolyase, Six Thinking Hats.

Введение

Химическое повреждение ДНК и наследуемая мутация относятся к разным уровням описания. Повреждение может быть устранено, сохранено либо превращено в изменение последовательности при последующей репликации [1; 2; 9]. Цель работы - упорядочить сопоставление фотохимического события, аналитического сигнала и клеточного ответа, не смешивая эти уровни.

Материалы и методы

Использовано сопоставление описанных в литературе механизмов и средств их исследования [3; 5; 6; 7; 8; 9; 10]. Метод шести шляп [4] служит порядком экспертного рассуждения, а не способом регистрации ДНК-повреждений. Белая шляпа отведена дозе и установленным фотопродуктам; чёрная - альтернативным объяснениям; жёлтая - обоснованным возможностям метода; зелёная - проверяемым гипотезам; синяя - организации протокола и вывода. Красная шляпа сохраняет исходное значение интуитивной реакции: опасения фиксируют отдельно и не используют как доказательства.

В научной части разграничивают циклобутановые пиримидиновые димеры, пиримидин-пиримидоновые (6–4)-фотопродукты и окислительные модификации оснований. Фотолиазы непосредственно обращают соответствующие фотопродукты у организмов, обладающих этими ферментами. У человека собственная фотолиазная фотореактивация отсутствует; объёмные повреждения устраняются преимущественно эксцизионной репарацией нуклеотидов [6; 7; 10].

Рисунок 1. Шесть направлений экспертного разбора фотохимического повреждения ДНК

Результаты и обсуждение

Схема выявляет принципиальную асимметрию доказательств: известная доза не определяет однозначно состав повреждений, а уменьшение сигнала не устанавливает путь репарации. Для разграничения процессов нужны измерение специфических поражений и независимая оценка жизнеспособности. Окислительные модификации также требуют отдельного рассмотрения, поскольку их образование зависит от фотосенсибилизации и среды [3].

Таблица 1. Соответствие повреждений и средств их аналитического различения

Объект анализа	Подход	Предел вывода
Пиримидиновые фотопродукты	Специфические антитела	Зависимость от специфичности
Окислённые нуклеозиды	Хроматография с масс-спектрометрией	Контроль окисления при подготовке
Разрывы и щёлочелабильные участки	Кометный анализ	Нет прямой идентификации всех фотопродуктов

Различие между глобальной и сопряжённой с транскрипцией ветвями эксцизионной репарации существенно для интерпретации неодинаковой скорости удаления повреждений в разных участках генома [5; 8; 10]. Если часть облучённых клеток погибла, уменьшение среднего сигнала в сохранившейся популяции не доказывает успешной репарации исходной популяции. По этой причине проценты восстановления без определения знаменателя, контроля гибели и времени наблюдения лишаются однозначного биологического содержания.

Заключение

В университетском разборе фотобиологических исследований Узбекистана целесообразно отдельно оценивать тип повреждения, путь репарации и состояние клеточной популяции. Шесть шляп упорядочивают экспертное обсуждение, сохраняя границу между фактом и предположением. Вывод о восстановлении ДНК требует специфических аналитических свидетельств, а не одного суммарного показателя.

Список литературы

1. Биохимия / под ред. Е.С. Северина. – М.: ГЭОТАР-МЕД, 2003. – 779 с.
2. Brash D.E. UV Signature Mutations // Photochemistry and Photobiology. – 2015. – Т. 91, № 1. – P. 15–26. – DOI: 10.1111/php.12377.
3. Cadet J., Wagner J.R. DNA Base Damage by Reactive Oxygen Species, Oxidizing Agents, and UV Radiation // Cold Spring Harbor Perspectives in Biology. – 2013. – Т. 5, № 2. – P. a012559–a012559. – DOI: 10.1101/cshperspect.a012559.
4. De Bono E. Six Thinking Hats. – Boston: Little, Brown, 1985. – 207 P.
5. Marteijn J.A., Lans H., Vermeulen W. et al. Understanding nucleotide excision repair and its roles in cancer and ageing // Nature Reviews Molecular Cell Biology. – 2014. – Т. 15, № 7. – P. 465–481. – DOI: 10.1038/nrm3822.
6. Ramírez-Gamboa D., Díaz-Zamorano A.L., Meléndez-Sánchez E.R. et al. Photolyase Production and Current Applications: A Review // Molecules. – 2022. – Т. 27, № 18. – DOI: 10.3390/molecules27185998.
7. Sancar A. Structure and Function of DNA Photolyase and Cryptochrome Blue-Light Photoreceptors // Chemical Reviews. – 2003. – Т. 103, № 6. – P. 2203–2238. – DOI: 10.1021/cr0204348.
8. Scharer O.D. Nucleotide Excision Repair in Eukaryotes // Cold Spring Harbor Perspectives in Biology. – 2013. – Т. 5, № 10. – P. a012609–a012609. – DOI: 10.1101/cshperspect.a012609.

9. Sinha R.P., Häder D.P. UV-induced DNA damage and repair: a review // Photochemical & Photobiological Sciences. – 2002. – T. 1, № 4. – P. 225–236. – DOI: 10.1039/b201230h.
10. Zachayus A., Loup-Forest J., Cura V. et al. Nucleotide Excision Repair: Insights into Canonical and Emerging Functions of the Transcription/DNA Repair Factor TFIIH // Genes. – 2025. – T. 16, № 2. – DOI: 10.3390/genes16020231.

References

1. Biokhimiya / pod red. E.S. Severina. – M.: GEOTAR-MED, 2003. – 779 s (In Russ.).
2. Brash D.E. UV Signature Mutations // Photochemistry and Photobiology. – 2015. – Vol. 91, No. 1. – P. 15–26. – DOI: 10.1111/php.12377.
3. Cadet J., Wagner J.R. DNA Base Damage by Reactive Oxygen Species, Oxidizing Agents, and UV Radiation // Cold Spring Harbor Perspectives in Biology. – 2013. – Vol. 5, No. 2. – P. a012559–a012559. – DOI: 10.1101/cshperspect.a012559.
4. De Bono E. Six Thinking Hats. – Boston: Little, Brown, 1985.
5. Marteijn J.A., Lans H., Vermeulen W. et al. Understanding nucleotide excision repair and its roles in cancer and ageing // Nature Reviews Molecular Cell Biology. – 2014. – Vol. 15, No. 7. – P. 465–481. – DOI: 10.1038/nrm3822.
6. Ramírez-Gamboa D., Díaz-Zamorano A.L., Meléndez-Sánchez E.R. et al. Photolyase Production and Current Applications: A Review // Molecules. – 2022. – Vol. 27, No. 18. – DOI: 10.3390/molecules27185998.
7. Sancar A. Structure and Function of DNA Photolyase and Cryptochrome Blue-Light Photoreceptors // Chemical Reviews. – 2003. – Vol. 103, No. 6. – P. 2203–2238. – DOI: 10.1021/cr0204348.
8. Scharer O.D. Nucleotide Excision Repair in Eukaryotes // Cold Spring Harbor Perspectives in Biology. – 2013. – Vol. 5, No. 10. – P. a012609–a012609. – DOI: 10.1101/cshperspect.a012609.
9. Sinha R.P., Häder D.P. UV-induced DNA damage and repair: a review // Photochemical & Photobiological Sciences. – 2002. – Vol. 1, No. 4. – P. 225–236. – DOI: 10.1039/b201230h.
10. Zachayus A., Loup-Forest J., Cura V. et al. Nucleotide Excision Repair: Insights into Canonical and Emerging Functions of the Transcription/DNA Repair Factor TFIIH // Genes. – 2025. – Vol. 16, No. 2. – DOI: 10.3390/genes16020231.

Статья поступила в редакцию: 04.11.2026
Статья принята к публикации: 12.11.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 664.788:613.2

Нутриентный профиль зернобобовых смесей с порошками крапивы, облепихи и чёрной смородины: сравнительный анализ рецептур

Камалова Фируза Рахматовна
соискатель
Бухарский государственный технический университет, старший преподаватель кафедры «Стандартизация, метрология и оценка соответствия»
Республика Узбекистан, г. Бухара
E-mail: kamalovafiruza884@mail.com

Nutrient profile of cereal–legume mixtures with nettle, sea buckthorn and blackcurrant powders: a comparative analysis of formulations

Kamalova Firuza Rakhmatovna
Applicant Bukhara State Technical University Senior Lecturer
Department of Standardization, Metrology, and Conformity Assessment
Uzbekistan, Bukhara

Аннотация

В статье представлен сравнительный анализ пищевой, энергетической и биологической ценности двух рецептур сухих зернобобовых смесей функционального назначения, обогащённых порошками нетрадиционного растительного сырья. Объектами исследования являлись пшенично-нутовая смесь с добавлением пшеничных отрубей, порошков листьев крапивы и плодов облепихи, а также гречнево-овсяная смесь с активированным пшеном, фасолью черноглазой и сублимированным порошком чёрной смородины. Цель исследования заключалась в сравнительной оценке нутриентного состава разработанных рецептур и определении их функциональной направленности. Расчётным методом на основании справочных данных определены содержание белков, жиров, углеводов, пищевых волокон, минеральных веществ, витаминов, энергетическая ценность и аминокислотный скор исследуемых смесей. Установлено, что обе рецептуры характеризуются близкой энергетической ценностью, однако существенно различаются по содержанию отдельных нутриентов. Пшенично-нутовая смесь отличается повышенным содержанием белка, пищевых волокон, кальция, витамина Е и β-каротина. Гречнево-овсяная смесь характеризуется более высоким содержанием витамина С и сбалансированностью по серосодержащим аминокислотам. Комбинирование зернового и бобового сырья способствует улучшению аминокислотного состава белка и повышению его биологической ценности.

Библиографическое описание: Камалова Ф.Р. Нутриентный профиль зернобобовых смесей с порошками крапивы, облепихи и чёрной смородины: сравнительный анализ рецептур // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23715

Установлено, что порция каждой смеси массой 50 г обеспечивает не менее 15 % суточной потребности в железе, магнии и фосфоре. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности использования разработанных рецептур при производстве функциональных пищевых продуктов и специализированных сухих смесей для рационального питания населения.

Abstract

The article presents a comparative analysis of the nutritional, energy and biological value of two formulations of dry cereal–legume mixtures designed for functional food applications and enriched with powders derived from unconventional plant materials. The research objects included a wheat–chickpea mixture supplemented with wheat bran, nettle leaf powder and sea buckthorn fruit powder, as well as a buckwheat–oat mixture containing activated millet, black-eyed beans and freeze-dried blackcurrant powder. The study aimed to compare the nutrient composition of the developed formulations and determine their functional nutritional properties. The protein, fat, carbohydrate, dietary fibre, mineral and vitamin contents, energy value and amino acid scores were determined using a calculation-based approach and reference nutritional composition data. The results demonstrated that both formulations have comparable energy values but differ considerably in their nutrient profiles. The wheat–chickpea mixture contains higher amounts of protein, dietary fibre, calcium, vitamin E and β-carotene. In contrast, the buckwheat–oat mixture is characterized by a higher vitamin C content and a more balanced composition of sulphur-containing amino acids. The combination of cereal and legume raw materials contributes to improving the amino acid profile and biological value of plant-based proteins. A 50 g serving of each mixture provides at least 15 % of the recommended daily intake of iron, magnesium and phosphorus. The findings demonstrate the potential of the developed formulations for manufacturing functional food products and specialized dry food mixtures intended to improve nutritional quality and support a balanced diet.

Ключевые слова: функциональные пищевые продукты, зернобобовые смеси, нут, гречиха, крапива, облепиха, чёрная смородина, пищевые волокна, минеральные вещества, витаминный состав, аминокислотный скор, биологическая ценность.

Keywords: functional foods, cereal–legume mixtures, chickpea, buckwheat, nettle, sea buckthorn, blackcurrant, dietary fibre, minerals, vitamin composition, amino acid score, biological value.

Введение

Рацион значительной части населения характеризуется недостаточным потреблением пищевых волокон, кальция, магния, витаминов-антиоксидантов и полноценного белка [7; 10]. Зерновые продукты — каши, хлопья, сухие смеси — занимают устойчивое место в ежедневном питании и являются удобной матрицей для функционального обогащения. Однако белок злаков лимитирован по лизину, а белок бобовых — по серосодержащим аминокислотам, поэтому их комбинирование обеспечивает взаимодополняющий аминокислотный профиль [2; 9] (рисунок 1).

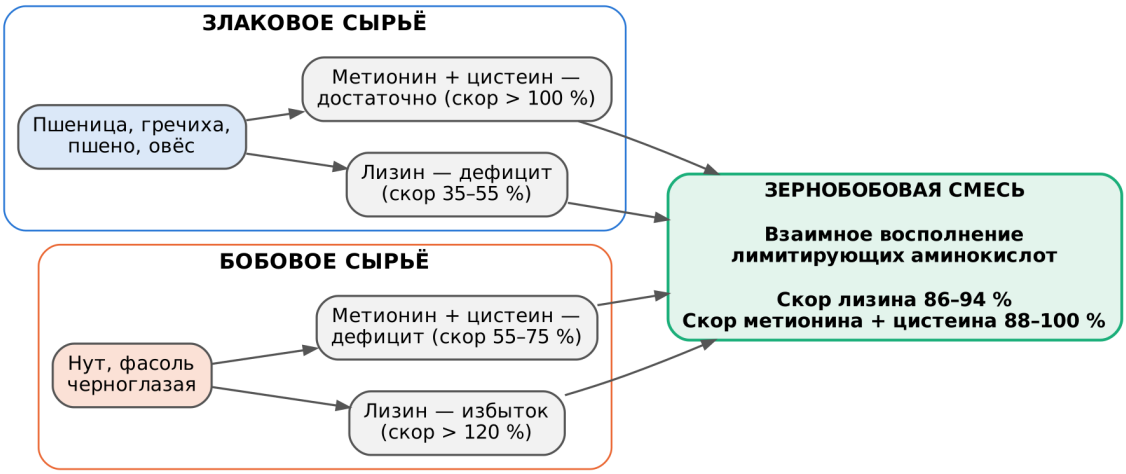


Рисунок 1. Схема взаимодополнения лимитирующих аминокислот злакового и бобового сырья

Дополнительным резервом повышения пищевой ценности является введение порошков нетрадиционного растительного сырья: листья крапивы богаты кальцием, железом и каротиноидами [8], плоды облепихи — токоферолами, каротиноидами и витамином С [5], ягоды чёрной смородины — аскорбиновой кислотой и антоцианами [1; 6]. Ферментация и проращивание зерна снижают содержание фитиновой кислоты и повышают биодоступность минеральных веществ [8].

Цель работы — сравнительная оценка пищевой и биологической ценности двух рецептур зернобобовых смесей функционального назначения

Материалы и методы

Объектами исследования служили две рецептуры сухих смесей (таблица 1, рисунок 2).

Таблица 1. Рецептуры исследуемых зернобобовых смесей

Компонент смеси 1	**Доля, %**	**Компонент смеси 2**	**Доля, %**
Цельносмолотая пшеничная крупа	40,0	Крупа гречневая (ядрица)	40,0
Нутовая мука	40,0	Овсяные хлопья (ферментированные)	25,0
Пшеничные отруби	8,0	Пшено активированное	20,0
Порошок листьев крапивы	7,0	Фасоль черноглазая (мука)	10,0
Порошок плодов облепихи	5,0	Чёрная смородина (сублимированный порошок)	5,0
Итого	**100,0**	**Итого**	**100,0**

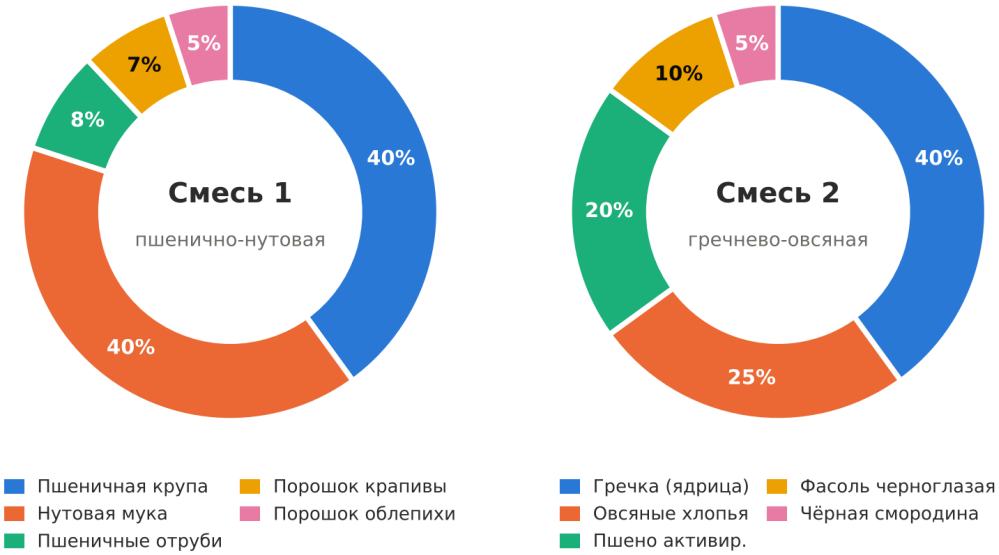


Рисунок 2. Структура рецептур исследуемых смесей, % по массе

Обе рецептуры построены по единому принципу: 80–85 % составляет зерновое и бобовое сырьё, 10–15 % — функциональные обогатители. Различие заключается в соотношении «злаки: бобовые»: в смеси 1 оно составляет 1,2: 1, в смеси 2 — 8,5: 1. Принципиальная технологическая схема производства смесей приведена на рисунке 3; при её разработке учитывали последовательность подготовки, обработки, измельчения и сушки растительного сырья.

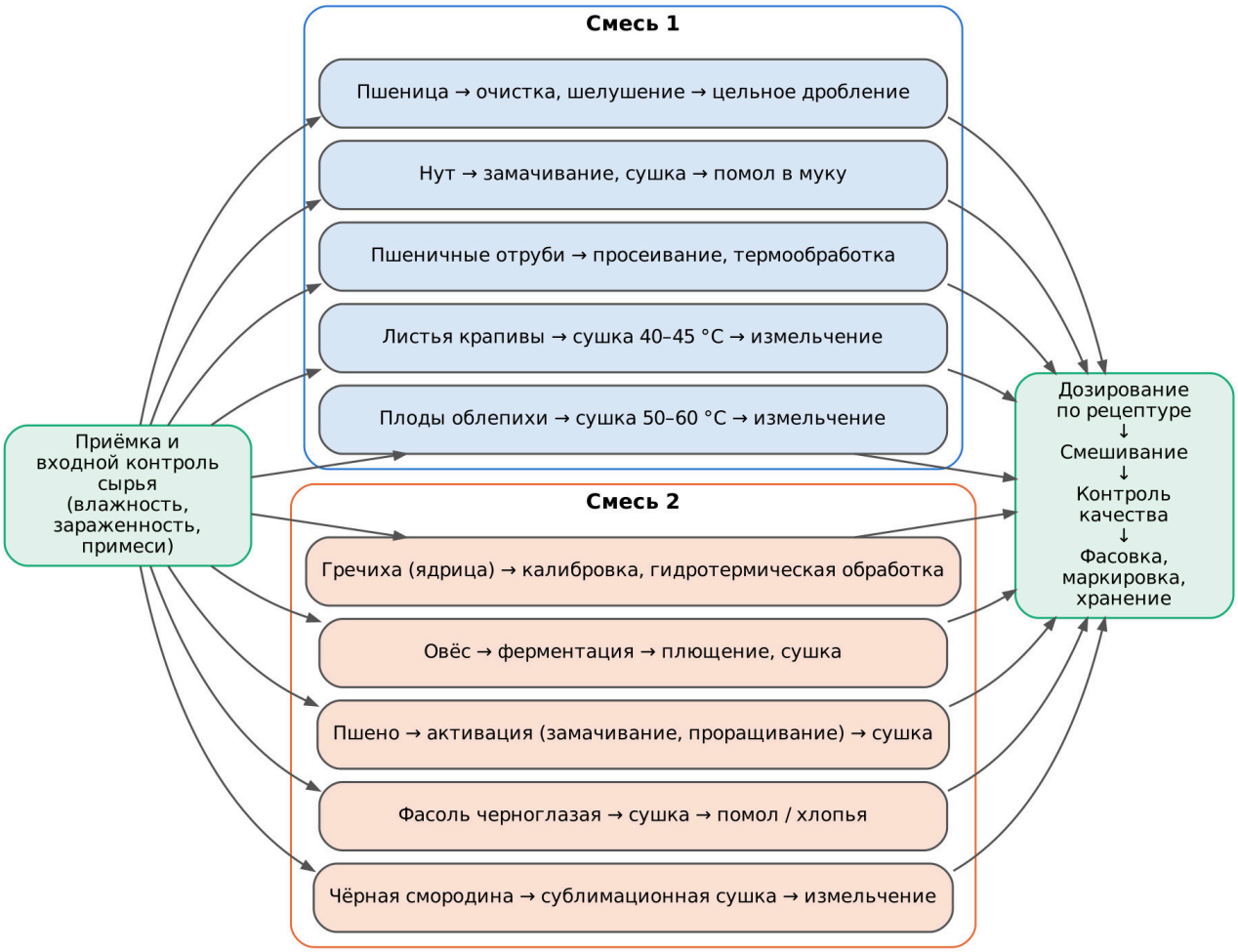


Рисунок 3. Принципиальная технологическая схема производства зернобобовых смесей

Химический состав смесей рассчитывали по принципу аддитивности на основании справочных данных [1] и опубликованных сведений о составе порошков крапивы, облепихи и смородины [1; 4; 5; 6]. Энергетическую ценность определяли с коэффициентами 4 ккал/г для белков и углеводов, 9 ккал/г для жиров, 2 ккал/г для пищевых волокон. Степень удовлетворения суточной потребности оценивали по ТР ТС 022/2011 [13]; продукт считали функциональным по нутриенту, если порция (50 г) обеспечивает не менее 15 % суточной потребности [12]. Аминокислотный скор рассчитывали по шкале ФАО/ВОЗ (лизин — 5,5 г, метионин + цистеин — 3,5 г/100 г белка).

Результаты и обсуждение

Пищевая и энергетическая ценность. Расчётные данные приведены в таблице 2 и на рисунке 4

Таблица 2. Пищевая и энергетическая ценность смесей (на 100 г)

Показатель	Смесь 1	Смесь 2	Разница, %	% РСП (смесь 1 / 2)
Белки, г	17,1	12,9	+31,8	23 / 17
Жиры, г	5,2	4,0	+30,3	6 / 5
Усвояемые углеводы, г	49,5	57,9	-14,5	14 / 16

Показатель	Смесь 1	Смесь 2	Разница, %	% РСП (смесь 1 / 2)
Пищевые волокна, г	15,7	9,7	+61,5	52 / 32
Энергетическая ценность, ккал	344,9	339,1	+1,7	14 / 14

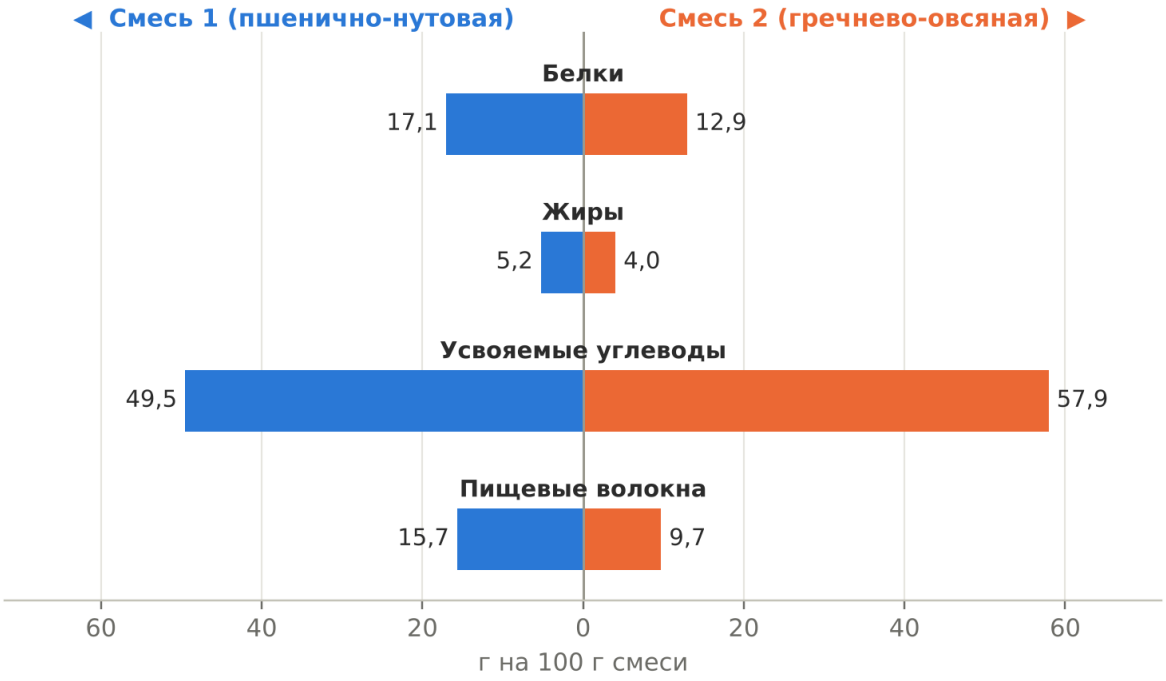


Рисунок 4. Сравнение содержания основных пищевых веществ в смесях, г/100 г

При близкой энергетической ценности (345 и 339 ккал/100 г) смеси существенно различаются по структуре. Смесь 1 содержит на 31,8 % больше белка за счёт нутовой муки, на которую приходится 52,5 % белка смеси, и порошка крапивы. Содержание пищевых волокон в смеси 1 выше в 1,62 раза благодаря пшеничным отрубям [7; 10]. В смеси 2 волокна представлены в большей мере растворимыми β-глюканами овса, обладающими гипохолестеринемическим действием [7; 10]. На долю белков в энергетической ценности смеси 1 приходится 19,8 %, смеси 2 — 15,3 %, на долю углеводов — 57,4 и 68,3 % соответственно (рисунок 5). Таким образом, смесь 1 является продуктом с повышенным содержанием белка, а смесь 2 по структуре энергии ближе к традиционным злаковым продуктам.

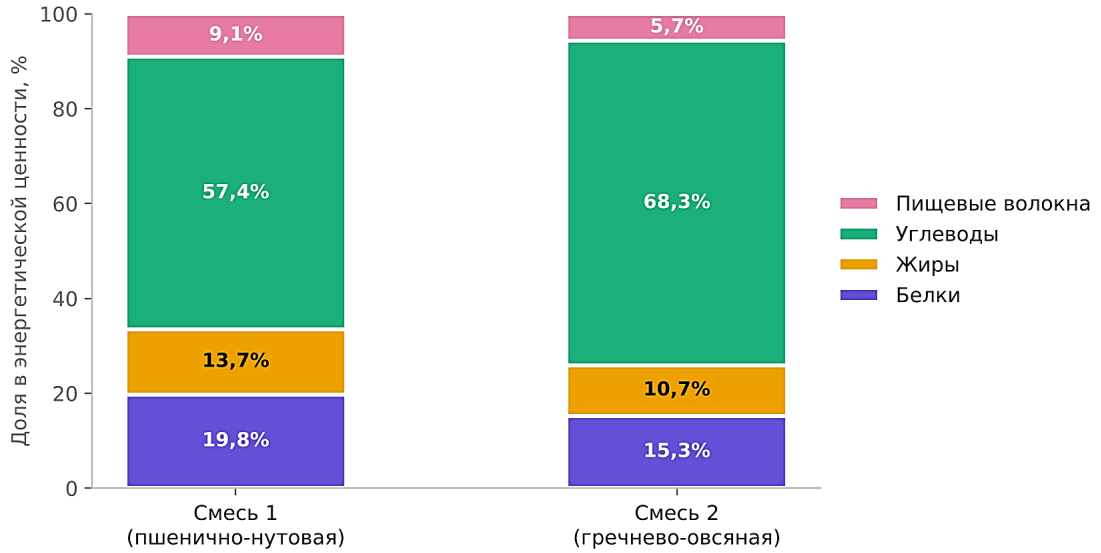


Рисунок 5. Распределение энергетической ценности смесей по источникам энергии, %

Минеральный и витаминный состав смесей представлен в таблице 3 и на рисунках 6 и 7

Смесь 1 превосходит смесь 2 по всем минеральным элементам. Наибольшее различие отмечено по кальцию — в 5,4 раза; при доле в рецептуре 7 % порошок крапивы обеспечивает около 78 % кальция смеси [3]. Соотношение Ca: P в смеси 1 составляет 1: 1,46, в смеси 2 — 1: 6,26, что менее благоприятно для усвоения кальция. В смеси 2 негативное влияние фитатов частично компенсируется ферментацией овса и активацией пшена [4]. Порция 50 г обеих смесей обеспечивает не менее 15 % РСП железа, магния и фосфора.

Таблица 3. Содержание минеральных веществ и витаминов в смесях

Показатель	Смесь 1, на 100 г	Смесь 2, на 100 г	РСП	% РСП в порции 50 г (смесь 1 / 2)
Кальций, мг	260,6	47,9	1000	13 / 2
Железо, мг	6,53	5,33	14	23 / 19
Магний, мг	190,3	156,3	400	24 / 20
Калий, мг	788	489	3500	11 / 7
Фосфор, мг	381,7	299,7	800	24 / 19
Цинк, мг	3,05	2,21	15	10 / 7
Витамин B1, мг	0,45	0,46	1,4	16 / 17
Витамин B2, мг	0,21	0,15	1,6	6 / 5
Витамин E, мг ТЭ	4,10	1,02	10	21 / 5
Витамин C, мг	28,5	42,6	60	24 / 36
β-каротин, мг	1,42	0,04	5	14 / 0

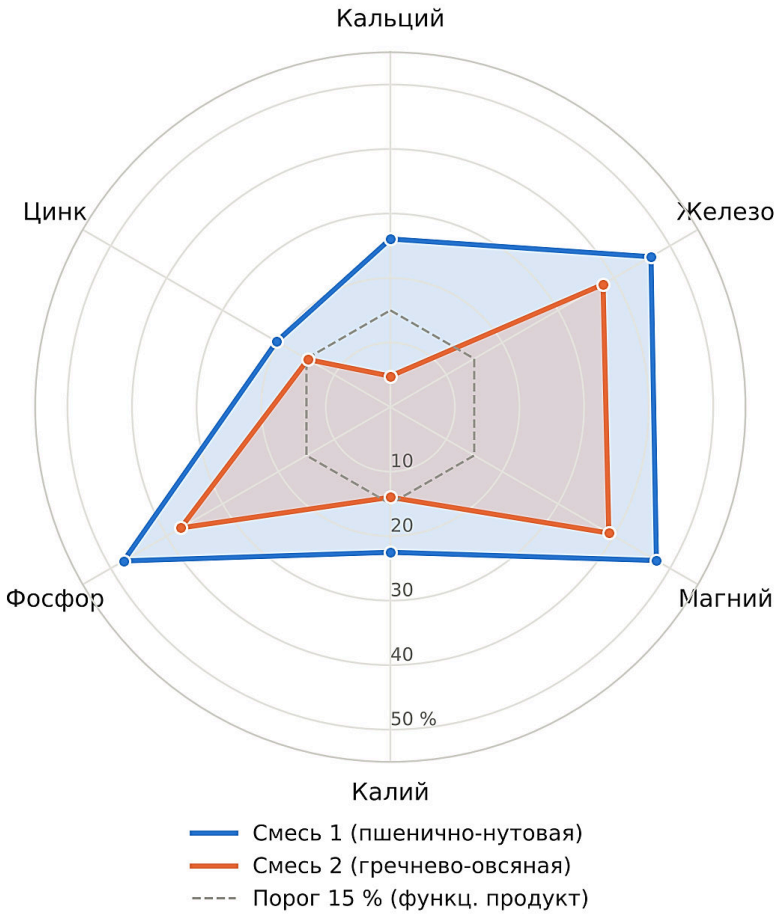


Рисунок 6. Профиль удовлетворения суточной потребности в минеральных веществах (100 г смеси), %

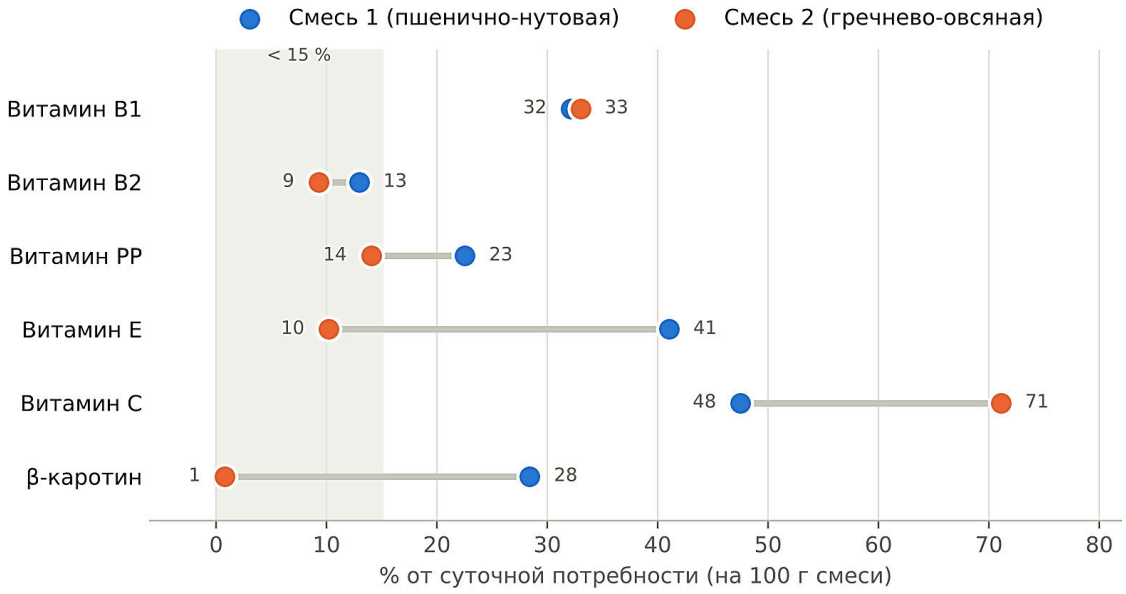


Рисунок 7. Удовлетворение суточной потребности в витаминах (100 г смеси), %

Содержание тиамина в смесях практически одинаково (0,45 и 0,46 мг/100 г). Смесь 1 содержит в 4,0 раза больше витамина Е и 1,42 мг/100 г β-каротина за счёт отрубей и облепихи [10]. Смесь 2 отличается более высоким содержанием витамина С (42,6 против 28,5 мг/100 г) благодаря сублимированному порошку смородины [6]; для его сохранения рекомендуется заваривание смеси при температуре не выше 70–80 °С.

Биологическая ценность белка. Аминокислотный скор лимитирующих аминокислот представлен на рисунке 8

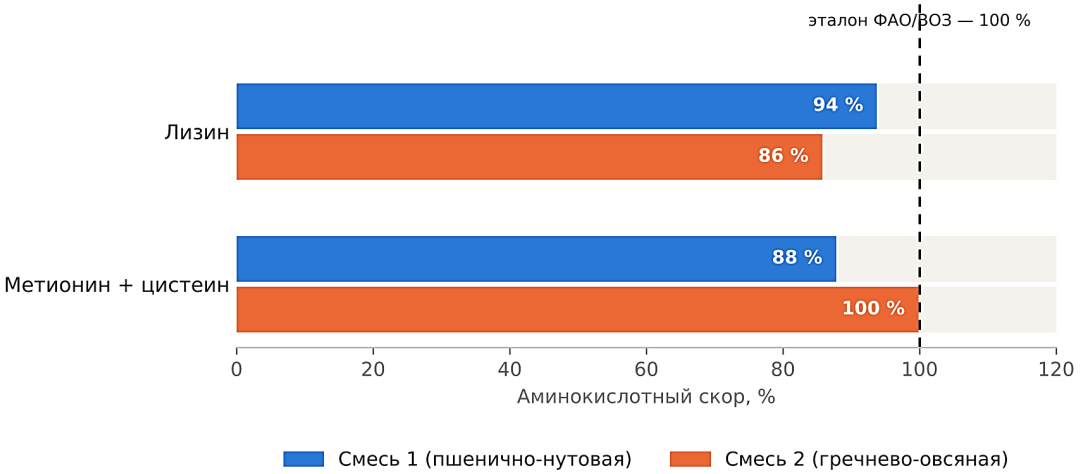


Рисунок 8. Аминокислотный скор лимитирующих аминокислот белка смесей, %

Скор лизина в смеси 1 составляет 94 %, в смеси 2 — 86 %, тогда как в белке пшеницы он не превышает 51 %, а пшена — 35 %. Следовательно, комбинирование злакового и бобового сырья практически устранило лизиновую недостаточность. По метионину + цистеину ситуация обратная: 100 % в смеси 2 и 88 % в смеси 1, поскольку при высокой доле нута они становятся лимитирующими. Белок смеси 2 более сбалансирован, а смесь 1 содержит больше «полноценного» белка: 15,0 против 11,1 г/100 г. Функциональная направленность компонентов смесей обобщена на рисунке 9.

Смесь 1 целесообразно позиционировать как высокобелковый продукт с повышенным содержанием пищевых волокон и кальция для лиц с высокой физической активностью и приверженцев растительного питания. Смесь 2 со сбалансированным аминокислотным составом и высоким содержанием витамина С пригодна для ежедневного питания широкого круга потребителей. Расчётный характер данных не учитывает технологические потери и биодоступность, что требует экспериментального подтверждения.

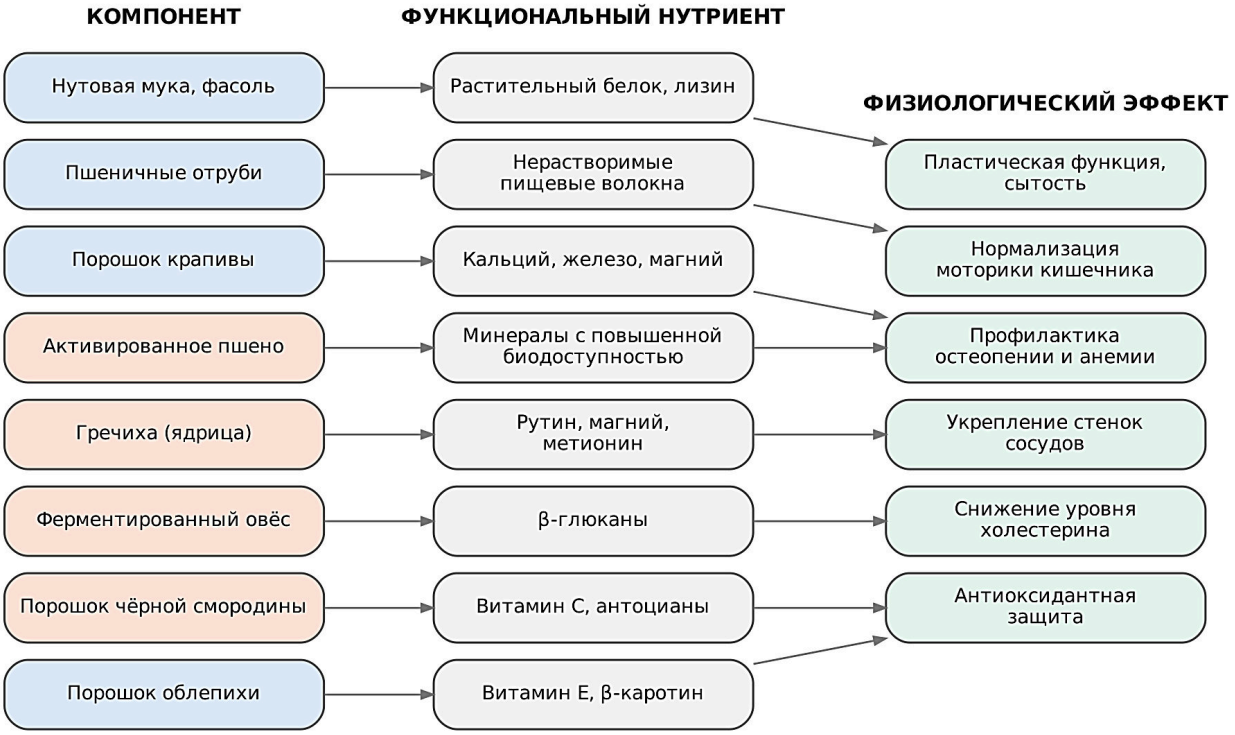


Рисунок 9. Схема функциональной направленности компонентов смесей (синий — смесь 1, оранжевый — смесь 2)

Заключение

1. Обе смеси имеют близкую энергетическую ценность (345 и 339 ккал/100 г), но различаются по структуре пищевых веществ.

2. Пшенично-нутовая смесь превосходит гречнево-овсяную по содержанию белка на 32 %, пищевых волокон — в 1,6 раза, кальция — в 5,4 раза, витамина Е — в 4,0 раза.

3. Гречнево-овсяная смесь отличается более высоким содержанием витамина С и сбалансированностью белка (скор метионина + цистеина 100 %).

4. Комбинирование злакового и бобового сырья повысило скор лизина до 86–94 %. Порция 50 г каждой смеси обеспечивает не менее 15 % суточной потребности в железе, магнии и фосфоре, что позволяет отнести их к функциональным продуктам.

Список литературы

1. U.S. Department of Agriculture. FoodData Central. Nutrient data for foods. Washington, DC: USDA; 2019 Available at: [Электронный ресурс]. – 2025. URL: https://fdc.nal.usda.gov/ (дата обращения: 18.11.2026).
2. FAO. Dietary protein quality evaluation in human nutrition: Report of an FAO Expert Consultation. FAO Food and Nutrition Paper 92. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations;. – 2013.
3. Jukanti A.K., Gaur P.M., Gowda C.L.L., Chibbar R.N. Nutritional quality and health benefits of chickpea (Cicer arietinum L.): a review // British Journal of Nutrition. – 2012. – Т. 108. – P. S11–S26. – DOI: 10.1017/S0007114512000797.

4. Đurović S., Pavlić B., Šorgić S. et al. Chemical composition of stinging nettle leaves obtained by different analytical approaches // Journal of Functional Foods. – 2017. – T. 32. – P. 18–26.
5. Suryakumar G., Gupta A. Medicinal and therapeutic potential of Sea buckthorn (Hippophae rhamnoides L.) // Journal of Ethnopharmacology. – 2011. – T. 138, № 2. – P. 268–278. – DOI: 10.1016/j.jep.2011.09.024.
6. Jakobek, L. Flavonols, phenolic acids and antioxidant activity of some red fruits / L. Jakobek, M. Šeruga, I. Novak, M. Medvidović-Kosanović // Deutsche Lebensmittel-Rundschau. – 2007. – T. 103. – P. 369–378.
7. Gong L., Cao W., Chi H. et al. Whole cereal grains and potential health effects: involvement of the gut microbiota // Food Research International. – 2018. – T. 103. – P. 84–102.
8. Schlemmer U., Frølich W., Prieto R.M., Grases F. Phytate in foods and significance for humans: food sources, intake, processing, bioavailability, protective role and analysis // Molecular Nutrition & Food Research. – 2009. – T. 53. – P. S330–S375. – DOI: 10.1002/mnfr.200900099.
9. Boye J., Zare F., Pletch A. Pulse proteins: processing, characterization, functional properties and applications in food and feed // Food Research International. – 2010. – T. 43, № 2. – P. 414–431. – DOI: 10.1016/j.foodres.2009.09.003.
10. EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition, and Allergies (NDA). Scientific Opinion on Dietary Reference Values for carbohydrates and dietary fibre // EFSA Journal. – 2010. – T. 8, № 3. – Art. 1462. – DOI: 10.2903/j.efsa.2010.1462.
11. WHO/FAO. Diet, Nutrition and the Prevention of Chronic Diseases. WHO Technical Report Series 916. Geneva: World Health Organization;. – 2003.
12. GOST R 52349 Food products. Functional food products. Terms and definitions. Moscow: Standartinform;. – 2005.
13. TR CU 022/2011. Food products in terms of their labelling: Technical Regulation of the Customs Union. Approved by Decision No. 881 of 9 December 2011.

Статья поступила в редакцию: 09.11.2026
Статья принята к публикации: 18.11.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 664.8.047:635.15

DOI: 10.32743/UniTech.2026.152.11.23755

Кинетика конвективной сушки кубиков дайкона, обработанных аскорбиновой кислотой

Мамадалиев Дониёр Шожалил ўғли
базовый докторант
Наманганский государственный университет
Республика Узбекистан, г. Наманган
ORCID: https://orcid.org/0009-0005-6653-0463
E-mail: mdoniyor272@gmail.com

Мелибоев Мираъзам Фозилжон ўғли
д-р техн. наук (DSc)
доц., Наманганский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Наманган
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8552-9477
E-mail: mirazamm@bk.ru

Kinetics of convective drying of daikon cubes treated with ascorbic acid

Mamadaliyev Doniyor Sh
Basic doctoral student
Namangan State University
Republic of Uzbekistan, Namangan

Meliboyev Mira'zam F.
Doctor of Technical Sciences (DSc)
Associate Professor,
Namangan State Technical University
Republic of Uzbekistan, Namangan

Аннотация

В данной статье исследованы образцы корнеплода белой редьки (Daikon), нарезанные кубиками и предварительно обработанные в течение 15 минут в 6 %-ном растворе аскорбиновой кислоты. Сушка проводилась конвективным способом в лабораторном сушильном шкафу при температурах 80, 90 и 100 °C, при открытии воздушной заслонки (flap) на 60 %. Конечная влажность высушенных образцов определялась с помощью электронного анализатора влажности KERN-DBS 60 – 3. Продолжительность сушки

Библиографическое описание: Мамадалиев Д.Ш.Ў., Мелибоев М.Ф.Ў. Кинетика конвективной сушки кубиков дайкона, обработанных аскорбиновой кислотой // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23755

составила 440 мин при 80 °C, 400 мин при 90 °C и 320 мин при 100 °C, при этом конечная влажность составила соответственно 7,75; 9,88 и 5,38 %. При повышении температуры от 80 до 100 °C продолжительность сушки сократилась на 27,3 %. По критериям продолжительности сушки и остаточной влажности режим при 100 °C был оценён как наиболее эффективный. Представленные результаты имеют важное практическое значение для оптимизации технологий переработки и длительного хранения корнеплодов в пищевой промышленности, позволяя снизить энергозатраты и сохранить пищевую ценность сырья.

Abstract

This article investigates cube-shaped samples of white radish (Daikon) root, which were pretreated in a 6 % ascorbic acid solution for 15 minutes. Convective drying was carried out in a laboratory drying oven at temperatures of 80, 90, and 100 °C, with the air flap opened to 60 %. The final moisture content of the dried samples was determined using a KERN-DBS 60 – 3 electronic moisture analyzer. The drying time was 440 min at 80 °C, 400 min at 90 °C, and 320 min at 100 °C, while the final moisture content was 7.75 %, 9.88 %, and 5.38 %, respectively. Increasing the temperature from 80 °C to 100 °C reduced the drying time by 27.3 %. Based on drying duration and residual moisture content, the drying regime at 100 °C was evaluated as the most effective. The obtained results are of practical importance for optimizing processing and long-term storage technologies for root vegetables in the food industry, helping to reduce energy costs while maintaining the nutritional value of the raw material.

Ключевые слова: дайкон, аскорбиновая кислота, кубическая форма, flap 60 %, конвективная сушка, кинетика сушки, анализатор влажности.

Keywords: Daikon, ascorbic acid, cubic shape, 60 % air flap opening, convective drying, drying kinetics, moisture analyzer.

Введение

Длительное хранение овощной продукции, сохранение её качественных показателей и биологически активных веществ являются одними из актуальных научно-технических задач пищевой промышленности. В корнеплоде белой редьки (Raphanus sativus var. longipinnatus), то есть дайконе, содержатся витамин С, минеральные соли, ферменты и пектиновые вещества. Однако из-за высокого содержания влаги (89–94 %) возможности его хранения в свежем виде ограничены.

Конвективная сушка является одним из широко распространённых и эффективных способов консервирования овощей, а её результат зависит от температуры сушильного агента, состояния системы циркуляции воздуха (flap), а также формы и размера продукта [3, 8, 10]. Кусочки кубической формы имеют одинаковую геометрию, что позволяет сравнивать тепло- и влагообмен при различных режимах, а также воспроизводить эксперимент [6].

Ферментативные реакции потемнения, протекающие в тканях редьки, снижают цветовые показатели и пищевую ценность продукта. Для предотвращения таких изменений технологически целесообразно перед сушкой проводить обработку в 6 %-ном растворе

аскорбиновой кислоты в течение 15 минут. Экспериментальная оценка влияния температурного режима на продолжительность сушки и остаточную влажность кубиков дайкона, подвергнутых такой обработке, имеет практическое значение.

Цель исследования — изучить кинетику конвективной сушки кубиков дайкона, обработанных аскорбиновой кислотой, при температурах 80, 90 и 100 °C в режиме flap 60 %, определить конечную влажность с помощью анализатора KERN-DBS 60 – 3 и установить оптимальный режим. Для этого были поставлены следующие задачи: подготовка образцов и кислотная обработка; регистрация продолжительности сушки при трёх температурах; определение конечной влажности; сравнение результатов и выбор эффективного режима.

Материалы и методы исследования

Образцы и их обработка. Для исследования были отобраны свежесобранные, однородные и неповреждённые корнеплоды дайкона (рис. 1). Корнеплоды промыли, очистили от кожуры и с помощью специального резака нарезали кубиками точных геометрических размеров. Подготовленные кубики для замедления процессов окисления и стабилизации структуры тканей погрузили на 15 минут в раствор аскорбиновой кислоты концентрацией 6 % (рис. 2, рис. 3), после чего избыточную влагу удалили с помощью впитывающей бумаги (рис. 4). Внешний вид высушенных кубиков представлен на рисунке 5, а полученного порошка — на рисунке 6.

Рисунок 1. Дайкон

Рисунок 2. Дайкон, нарезанный кубиками и помещённый в 6 %-ный раствор аскорбиновой кислоты

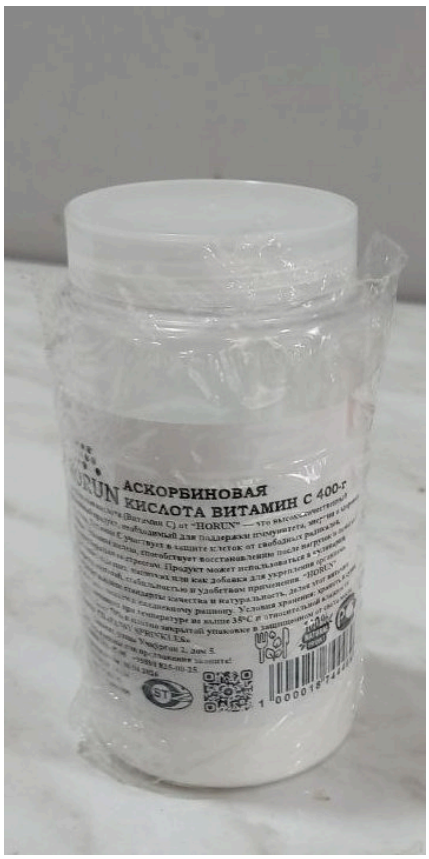


Рисунок 3. Аскорбиновая кислота

Рисунок 4. Кубики дайкона после извлечения из раствора, перед помещением в сушильный шкаф

Рисунок 5. Высушенные кубики дайкона

Рисунок 6. Порошок дайкона

Последовательность этапов эксперимента схематично показана на рисунке 7.

Рисунок 7. Схема этапов подготовки кубиков дайкона, сушки и определения влажности

Режим конвективной сушки. Эксперименты по сушке проводились в лабораторном сушильном шкафу с автоматическим контролем температуры. Степень открытия воздушной заслонки (flap) на протяжении всего эксперимента постоянно поддерживалась на уровне 60 %. Кубики, обработанные аскорбиновой кислотой, размещали в один слой на сушильной сетке и сушили при трёх различных температурах — 80, 90 и 100 °C. Для каждого режима регистрировали продолжительность сушки (мин).

Определение влажности с помощью анализатора KERN-DBS 60 – 3. Конечную влажность высушенных образцов измеряли при стандартной температуре 105 °C с помощью термогравиметрического анализатора влажности KERN-DBS 60 – 3 производства немецкой компании KERN & SOHN [7]. Относительную влажность (W, %) рассчитывали по следующей формуле:

$$W = [(m_1 - m_2) / m_1] \times 100\ \% \quad (1)$$

где: m_1 — начальная масса образца при помещении в анализатор, г; m_2 — масса образца после высушивания при 105 °C до постоянной массы (абсолютно сухая масса), г.

Расчётные показатели. Для оценки влияния температуры режим 80 °C был принят в качестве основы для сравнения. Относительное сокращение времени сушки (Δτ, %) и относительную среднюю скорость сушки (v) рассчитывали по следующим формулам:

$$\Delta\tau = [(\tau_{80} - \tau(T)) / \tau_{80}] \times 100\ \% \quad (2)$$

$$v = \tau_{80} / \tau(T) \quad (3)$$

где: τ_{80} и τ(T) — продолжительность сушки соответственно при 80 °C и анализируемой температуре, мин. Относительная скорость v введена как величина, обратная времени сушки, и служит для взаимного сравнения режимов.

Результаты и их обсуждение

Результаты сушки образцов дайкона кубической формы, обработанных в течение 15 минут в 6 %-ном растворе аскорбиновой кислоты, при температурах 80, 90 и 100 °C в режиме flap 60 % представлены в таблице 1, а их графическое изображение — на рисунках 8–10.

Таблица 1. Параметры сушки кубиков дайкона, обработанных в течение 15 мин в 6 %-ном растворе аскорбиновой кислоты в режиме flap 60 %, и результаты измерения влажности с помощью KERN-DBS 60 – 3

№	Температура, °C	Время, мин	Время, ч:мин	Сокращение времени, %	Относительная скорость, v	Конечная влажность, %
1.	80	440	7:20	0.0	1.00	7.75
2.	90	400	6:40	9.1	1.10	9.88
3.	100	320	5:20	27.3	1.38	5.38

Как видно из таблицы 1, процесс сушки при 80 °C продолжался 440 мин (7 ч 20 мин). При повышении температуры до 90 °C продолжительность сократилась до 400 мин (6 ч 40 мин), а при 100 °C — до 320 мин (5 ч 20 мин) (рис. 8). Это свидетельствует о сокращении времени соответственно на 9,1 и 27,3 % по сравнению с режимом 80 °C (рис. 9). Вместе с тем при переходе от 90 к 100 °C время сократилось на 80 мин (20 %), что в два раза больше сокращения при переходе от 80 к 90 °C (40 мин); относительная средняя скорость v также увеличилась с 1,00 до 1,10 и 1,38.

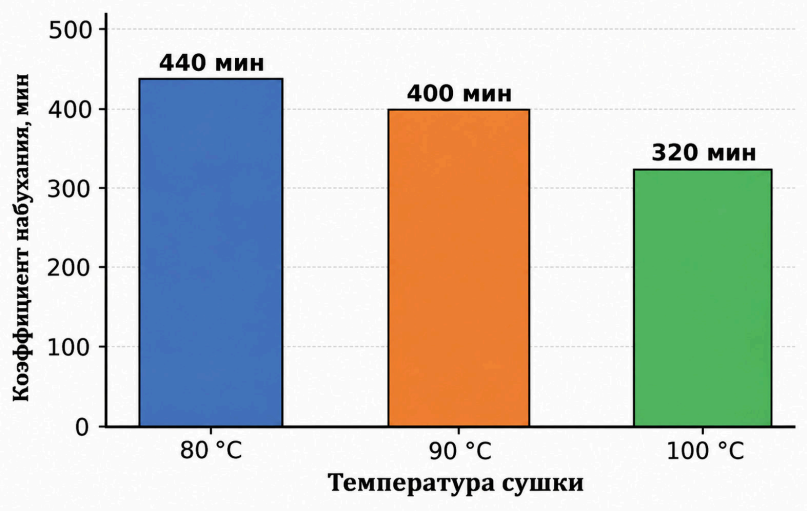


Рисунок 8. Зависимость продолжительности сушки от температуры (flap 60 %)

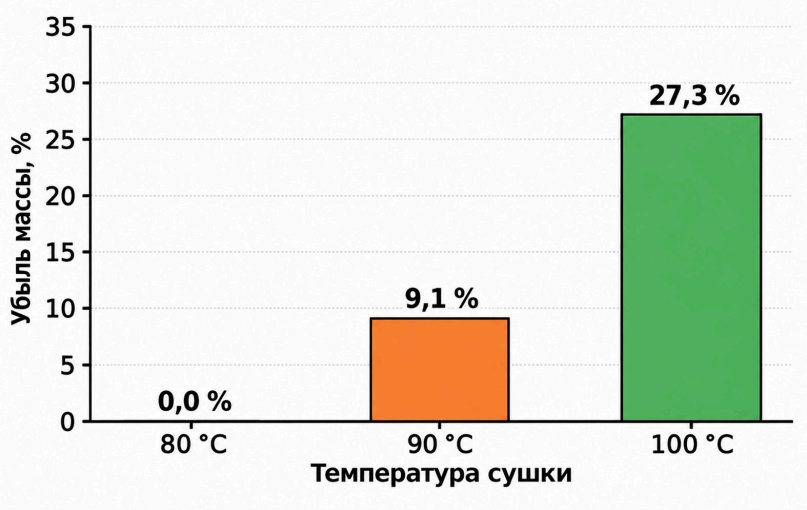


Рисунок 9. Сокращение продолжительности сушки относительно режима 80 °C

Причина ускорения сушки заключается в том, что с повышением температуры увеличивается разность температур между сушильным агентом и продуктом, а также разность давлений водяного пара между поверхностью продукта и воздухом; в результате интенсифицируются теплообмен и испарение влаги, а также повышается скорость диффузии влаги внутри тканей [8, 10]. Полученные результаты соответствуют этой общей закономерности.

Конечная влажность составила 7,75 % при 80 °C, 9,88 % при 90 °C и 5,38 % при 100 °C (рис. 10). Наименьшая остаточная влажность была зафиксирована при режиме 100 °C. При 90 °C влажность оказалась выше, чем при 80 °C, поэтому однозначная монотонная зависимость от температуры не наблюдалась. Такое отклонение может быть связано с различиями начальной влажности, размеров кубиков и их расположения на сетке, различиями критерия завершения сушки или поглощением образцом влаги из воздуха до измерения. Для выяснения этого необходимо повторить эксперименты несколько раз и представить результаты в виде среднего значения ± стандартного отклонения.

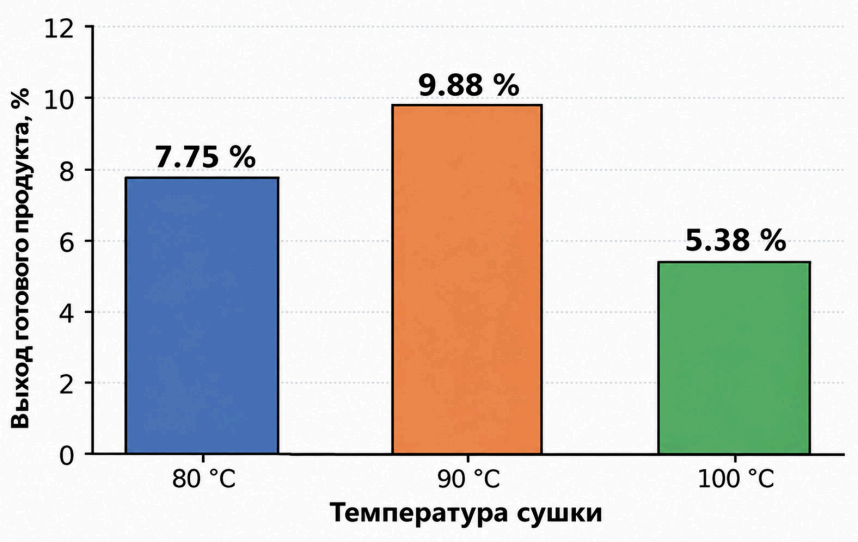


Рисунок 10. Конечная влажность высушенных кубиков дайкона (KERN-DBS 60 – 3, 105 °C)

По критериям продолжительности сушки и остаточной влажности наилучшие показатели в режиме flap 60 % были получены при 100 °C: минимальное время (320 мин) и наименьшая влажность (5,38 %). Вместе с тем при высокой температуре возможно частичное разложение аскорбиновой кислоты и других термолабильных веществ, а также уплотнение поверхностного слоя с образованием корочки. Эти показатели в данной работе не измерялись, поэтому полную оптимальность режима 100 °C необходимо подтвердить дополнительными исследованиями содержания витамина C, цвета и способности продукта к регидратации.

В данной работе были зарегистрированы продолжительность сушки и конечная влажность, тогда как изменение влажности в промежуточные моменты времени не измерялось. Для более глубокого описания кинетики на следующем этапе целесообразно получать кривые отношения влагосодержания (MR) каждые 30–60 минут, аппроксимировать их моделями Lewis, Page и Henderson–Pabis, а также рассчитывать эффективный коэффициент диффузии и энергию активации.

Заключение

1. Экспериментально показано, что конвективная сушка кубиков дайкона, обработанных в течение 15 мин в 6 %-ном растворе аскорбиновой кислоты, при 80–100 °C в режиме flap 60 % позволяет получить высушенный продукт с конечной влажностью 5,38–9,88 %.

2. По результатам измерений анализатора влажности KERN-DBS 60 – 3 в режиме flap 60 % были зафиксированы следующие показатели: при 80 °C — 440 мин (7,75 %), при 90 °C — 400 мин (9,88 %) и при 100 °C — 320 мин (5,38 %).

3. При повышении температуры от 80 до 100 °C время сушки сократилось на 120 мин (27,3 %), а относительная средняя скорость сушки увеличилась в 1,38 раза.

4. Поскольку сушка при температуре 100 °C в режиме flap 60 % обеспечила наименьшую продолжительность (320 мин, 5 ч 20 мин) и наименьшую остаточную влажность (5,38 %), данный режим рекомендуется как наиболее эффективный технологический режим по критериям времени и влажности; при этом требуются дополнительные исследования качественных показателей продукта (витамина С, цвета).

Список литературы

1. Мансуров О.А., Игамбердиева Д.А., Хамдамов А.М. Системный анализ процесса сушки сельскохозяйственных продуктов // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. – 2021. – № 11 (92). – С. 45–50. URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/12535 (дата обращения: 14.12.2022).
2. Международный опыт переработки плодоовощной продукции / под ред. А. Вахидова. – Ташкент: Фан, 2021. – 180 с.
3. Мелибоев М.Ф. Использование высокоэффективных комбинированных методов при сушке слив: дис. … д-ра философии (PhD) по техн. наукам. – Ташкент: ТКТИ. – 2022. – 104 с.
4. Поспелова И.Г. Разработка технологии сублимационной сушки плодов и овощей с использованием СВЧ- и УЗ-воздействия: автореф. дис. канд. техн. наук. – Ижевск, 2009. – 20 с.
5. Сайфитдинов А.С. Преподавание технологического образования с использованием интерактивных методов // Экономика и общество. – 2023. – № 01 (104). – С. 112–115.
6. Салимов З. Основные процессы и аппараты химической технологии: учебник для студентов высших учебных заведений. Т. 1. – Ташкент: Узбекистан, 1994. – 366 с.
7. Салимов З. Основные процессы и аппараты химической технологии. Т. 2. Массообменные процессы: учебник для высших учебных заведений. – Ташкент: Узбекистан, 1995. – 238 с.
8. Худайбердиев Т.Л. Технология и оборудование для сушки сельскохозяйственных продуктов: учебник. – Ташкент: Изд-во «Мухр пресс», 2022. – 232 с.
9. Эргашев О.К., Эгамбердиев А.А., Хамдамов А.М., Маллабоев О.Т. Исследование процесса сублимационной сушки плодов сливы // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. – 2022. – № 12 (105). – С. 12–18. URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/14806 (дата обращения: 26.02.2023).
10. Юсупбеков Н.Р., Нурмухамедов Х.С., Зокиров С.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – Ташкент: «Наука и технология», 2015. – 848 с.

References

1. Mansurov O.A., Igamberdieva D.A., Khamdamov A.M. [System analysis of the process of drying agricultural products] // Universum: tekhnicheskie nauki: elektron. nauchn. zhurn. – 2022. – No. 11 (92) [Электронный ресурс]. – URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/12535. (In Russ.).

2. [International experience in processing fruit and vegetable products] / pod red. A. Vakhidova. – Tashkent: Fan, 2021. – 180 s (In Russ.).
3. Meliboev M.F. [Use of highly efficient combined methods in plum drying: dissertation. Doctor of Philosophy (PhD) in Technical Sciences]. – Tashkent: TKTI. – 104 s. – 2022. (In Russ.).
4. Pospelova I.G. [Development of freeze-drying technology for fruits and vegetables using microwave and ultrasonic exposure: abstract of dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences]. – Izhevsk, 2009. – 20 s (In Russ.).
5. Sajfitdinov A.S. [Teaching technological education using interactive methods] // Ekonomika i obshchestvo. – 2023. – No. 01 (104). (In Russ.).
6. Salimov Z. [Basic processes and apparatuses of chemical technology: textbook for students of higher educational institutions]. T. 1. – Tashkent: Uzbekistan, 1994. – 366 s (In Russ.).
7. Salimov Z. [Basic processes and apparatuses of chemical technology]. T. 2. Massoobmennye protsessy: uchebnik dlya vysshikh uchebnykh zavedenij. – Tashkent: Uzbekistan, 1995. – 238 s (In Russ.).
8. Khudajberdiev T.L. [Technology and equipment for drying agricultural products: textbook]. – Tashkent: Izd-vo «Mukhr press», 2022. – 232 s (In Russ.).
9. Ergashev O.K., Egamberdiev A.A., Khamdamov A.M., Mallaboev O.T. [Investigation of the process of freeze-drying plum fruits] // Universum: tekhnicheskie nauki: elektron. nauchn. zhurn. – 2023. – No. 12 (105) [Электронный ресурс]. – URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/14806. (In Russ.).
10. Yusupbekov N.R., Nurmukhamedov Kh.S., Zokirov S.G. [Basic processes and apparatuses of chemical technology]. – Tashkent: «Nauka i tekhnologiya», 2015. – 848 s (In Russ.).

Статья поступила в редакцию: 05.11.2026
Статья принята к публикации: 16.11.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 664.68+633.1

DOI: 10.32743/UniTech.2026.152.11.23748

Исследование зародышей пшеницы для производства мучных кондитерских изделий с высокой питательной ценностью

Миралимова Азиза Исамутдиновна
ст. преп. кафедры «Технология пищевых и парфюмерно-косметических продуктов»
Ташкентский химико-технологический институт
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: miralimovaaziza85@gmail.com

Сарболаев Фаррухбек Набиевич
ст. преп
кафедры (PhD) «Технология пищевых и парфюмерно-косметических продуктов»
Ташкентский химико-технологический институт, Республика Узбекистанан
г. Ташкент
E-mail: sarbolayev_f@mail.ru

Махмудова Дилдора Хасановна
доц. кафедры (PhD)
«Технология пищевых и парфюмерно-косметических продуктов» Ташкентский химико-технологический институт
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: dildoramahmudiva@gmail.com

Investigation of wheat germ for the production of flour confectionery products with high nutritional value

Miralimova Aziza
senior lecturer of the Department of Food and Perfume and Cosmetic Products Technology
Tashkent chemical-technological institute
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Sarbolayev Farrukhbek
senior lecturer (PhD)
of the Department of Food and Perfume and Cosmetic Products Technology, Tashkent chemical-technological institute
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Библиографическое описание: Миралимова А.И., Сарболаев Ф.Н., Махмудова Д.Х. Исследование зародышей пшеницы для производства мучных кондитерских изделий с высокой питательной ценностью // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23748

Makhmudova Dildora
Associate Professor of the Department of Food and Perfume and Cosmetic Products Technology
Tashkent chemical-technological institute
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

Цель исследования — проанализировать химический состав и пищевую ценность зародышей пшеницы, а также оценить возможности их применения в мучных кондитерских изделиях. В работе рассмотрены зародыши сортов «Chillaki», «Kupava», «Polovchanka» и «Andijon-1», выращиваемых в Узбекистане. Сопоставлены приведённые в исследовании данные о содержании основных пищевых компонентов и обобщены сведения научной литературы о технологических свойствах зародыша. Содержание белка составило 21,50–22,20 %, жира — 12,05–13,25 %, пищевых волокон — 2,33–2,35 %. Наибольшее содержание масла в зародыше отмечено у сорта «Polovchanka» (13,1–13,4 %), наименьшее — у «Kupava» (11,8–12,3 %). У сортов «Chillaki» и «Andijon-1» показатель находился в пределах 12,3–12,6 и 12,1–12,3 % соответственно. Анализ подтверждает перспективность зародыша пшеницы как источника белка, липидов, минеральных веществ и биологически активных соединений, включая токоферолы и фитостеролы. Вместе с тем высокое содержание липидов и присутствие эндогенных ферментов требуют учитывать риск ухудшения качества сырья при хранении. На основании анализа обоснована возможность использования зародыша пшеницы для повышения пищевой ценности печенья. Для последующей экспериментальной проверки предложены варианты замены пшеничной муки продуктом из зародыша на уровне 5, 10 и 15 % с оценкой качества готовых изделий. Полученные результаты могут служить основой для разработки рецептур мучных кондитерских изделий повышенной пищевой ценности.

Abstract

The aim of this study was to analyze the chemical composition and nutritional value of wheat germ and assess its potential use in flour-based confectionery products. Wheat germ from four varieties cultivated in Uzbekistan—Chillaki, Kupava, Polovchanka, and Andijon-1—was considered. The compositional data presented in the article were compared, and relevant literature on the technological properties of wheat germ was reviewed. The reported protein content ranged from 21.50 to 22.20 %, fat from 12.05 to 13.25 %, and dietary fiber from 2.33 to 2.35 %. The highest oil-content range was observed for Polovchanka (13.1–13.4 %), while the lowest was reported for Kupava (11.8–12.3 %). The corresponding values were 12.3–12.6 % for Chillaki and 12.1–12.3 % for Andijon-1. The findings indicate that wheat germ is a promising source of protein, lipids, minerals, and bioactive compounds, including tocopherols and phytosterols. However, the relatively high lipid content and endogenous enzyme activity make deterioration during storage an important technological consideration. The potential use of wheat germ to enhance the nutritional value of cookies was discussed. For future experimental validation, formulations replacing 5, 10, and 15 % of wheat flour with a wheat germ ingredient were proposed for comparison with a control, followed by assessment of finished-product quality. The results provide a basis for further development of nutritionally enhanced flour-based confectionery products.

Ключевые слова: зародыш пшеницы, сорта пшеницы, химический состав, содержание масла, пищевая ценность, печенье, обогащение пищевых продуктов.

Keywords: wheat germ, wheat varieties, chemical composition, oil content, nutritional value, cookies, food enrichment.

Введение

Пшеница входит в тройку наиболее потребляемых зерновых культур во всём мире и считается одной из первых сельскохозяйственных культур, широко введённых в культуру около 10 000 лет назад [1, 2]. В настоящее время она по-прежнему является основой глобальной продовольственной системы, обеспечивая около 20 % потребляемых населением мира калорий и белка [3].

Пшеница является одной из основных продовольственных культур в мире. Из неё производят муку, хлеб, макаронные изделия, крупы и другие пищевые продукты. В процессе переработки зерна пшеницы наряду с основным продуктом образуются различные побочные продукты и фракции, в том числе отруби и зародыш пшеницы. Рациональное использование этих фракций способствует экономии сырьевых ресурсов, повышению эффективности производства и улучшению биологической ценности пищевых продуктов.

Согласно официальным статистическим данным Республики Узбекистан, объём производства пшеницы в стране увеличился с 6 165,4 тыс. тонн в 2020 году до 6 729,4 тыс. тонн в 2024 году [2]. Зародыш пшеницы может составлять приблизительно 2,5–3,8 % от массы зерна [3]. Исходя из этой доли, теоретическое количество зародыша, содержащегося в пшенице, выращенной в Узбекистане в 2024 году, может составлять около 168,2–255,7 тыс. тонн. Однако данный расчёт представляет собой теоретическую оценку доли зародыша в составе зерна и не отражает фактическое количество зародыша, которое может быть выделено в промышленных условиях. Фактический выход зависит от анатомических особенностей зерна, технологии измельчения, используемого оборудования для разделения фракций и технологических потерь.

В промышленной практике при производстве пшеничной муки в значительных объёмах образуются такие побочные продукты, как пшеничные отруби и зародыш пшеницы. Это обусловлено прежде всего тем, что данные фракции оказывают отрицательное влияние на стабильность муки и срок её хранения. Традиционно эти фракции использовались преимущественно в направлениях с относительно низкой экономической ценностью, например в качестве кормов для сельскохозяйственных животных. Однако богатый химический состав данных видов сырья позволяет переосмыслить их ценность и рассматривать их в качестве перспективного сырья в рамках современных концепций зернового биорефайнинга.

С этой точки зрения процессы переработки пшеницы постепенно переходят к стратегиям комплексного использования сырья. При этом особое внимание уделяется не только рассмотрению различных фракций в качестве отходов или побочных продуктов, но и их одновременному выделению и преобразованию в функциональные ингредиенты. Данные изменения отражают растущий интерес промышленности к эффективному использованию ресурсов, сокращению объёмов отходов и производству продукции с высокой добавленной стоимостью на основе существующих агропромышленных потоков [4].

Пшеничные отруби составляют приблизительно 14–19 % массы зерна и характеризуются высоким содержанием пищевых волокон, важных микронутриентов и биологически активных соединений, связанных с физиологическими эффектами. К установленным физиологическим эффектам этих соединений относятся, в частности, регуляция процессов ферментации в кишечнике и увеличение объёма каловых масс [5, 6].

Однако функциональные свойства указанных компонентов в значительной степени зависят от их структурного расположения в сложной и прочной матрице клеточных стенок. Значения химического состава пшеничных отрубей, приводимые в научной литературе, варьируются в зависимости от генотипа пшеницы, агротехнических условий её выращивания, степени чистоты фракции, выделенной на мельнице, а также используемых аналитических методов. Это особенно актуально для количественного определения некрахмальных полисахаридов и методов экстракции фенольных соединений [5, 6].

Зародыш пшеницы (WG) характеризуется высокой концентрацией питательных веществ. В его состав входит приблизительно 8–13 % липидов, 25 % белков, 17 % углеводов, 1,5–4,5 % пищевых волокон и 4–5 % минеральных веществ (рисунок 1) [7, 8].

Зародыш пшеницы, представляющий собой эмбриональную часть зерна, является метаболически активным и богат не только основными питательными компонентами, но и эндогенными ферментами и биологически активными соединениями. Различия в показателях химического состава, приводимых в научной литературе, объясняются преимущественно степенью чистоты зародыша, количеством примесей эндосперма, а также различиями в методах экстракции.

Зародыш пшеницы является источником белков, жирных кислот, витаминов, минеральных веществ и таких биологически активных соединений, как токоферолы и фитостеролы. Вместе с тем содержащиеся в нём ненасыщенные жирные кислоты и активные ферменты могут способствовать развитию окислительных и гидролитических процессов в процессе хранения. Поэтому перед использованием зародыша в производстве пищевых продуктов важное значение имеют его выделение, очистка, стабилизация и измельчение до необходимой степени дисперсности.

Масло зародышей пшеницы может быть получено методом механического прессования или экстракции с использованием растворителей. При этом экстракция с применением растворителей, как правило, обеспечивает более высокий выход масла [9].

Однако выход и качество масла в значительной степени зависят от степени чистоты зародыша, наличия примесей отрубей или эндосперма, а также условий переработки. Несмотря на высокую пищевую ценность, переработка масла зародышей пшеницы сопряжена с рядом технологических проблем. Неочищенное масло, как правило, имеет тёмный цвет и вследствие склонности к окислительным процессам может обладать выраженными специфическими запахом и вкусом.

Поэтому для сохранения качества масла важное значение имеют его стабилизация и применение щадящих методов рафинации. Однако традиционные процессы рафинации нередко приводят к значительным потерям биологически активных соединений, особенно токоферолов [10].

Целью настоящей работы является анализ химического состава и технологических свойств зародыша пшеницы, а также обоснование возможности его использования при производстве мучных кондитерских изделий с высокой пищевой ценностью, в частности печенья.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования рассматривался зародыш пшеницы, выделенный из сортов «Chillaki», «Kupava», «Polovchanka» и «Andijon-1». Материалы исследования включали имеющиеся результаты по содержанию масла в зародышах различных сортов пшеницы, научную литературу, посвящённую химическому составу зародыша пшеницы, а также нормативные документы, регламентирующие требования к продуктам переработки зерна.

При определении влажности в качестве методической основы рассматривался стандарт ГОСТ 13586.5 – 2015 «Зерно. Метод определения влажности», применяемый для зерна и продуктов его переработки. Для определения содержания белка методической основой служил ГОСТ 10846-91 «Зерно и продукты его переработки. Метод определения белка», а для определения зольности — ГОСТ 27494-2016 «Мука и отруби. Методы определения зольности».

При определении содержания масла необходимо применять соответствующий утверждённый экстракционный метод, предназначенный для анализа зерна и продуктов его переработки. Содержание пищевых волокон следует определять с использованием отдельного аналитического метода, валидированного для данного вида сырья. Содержание углеводов рассчитывали по разности, вычитая сумму содержаний остальных основных компонентов из 100 %.

Результаты и обсуждение

Интенсивное развитие зерноводства в Узбекистане, в частности выращивания пшеницы, обусловило необходимость изучения многочисленных сортов, пригодных для возделывания в условиях жаркого климата как на богарных, так и на орошаемых землях. К числу таких сортов пшеницы относятся: «Intensivnaya», «Sanzar-8», «Baxt», «Yuna», «Kupava», «Chillaki», «Delta», «Andijon-1», «Andijon-2», «Yugtina», «Umanka», «Exo», «Polovchanka», «Kroshka», «Knyajna», «Hosildor» и другие.

В течение десяти лет указанные сорта проходили испытания в различных регионах Республики, в результате чего были выявлены наиболее продуктивные и высокоурожайные сорта.

Таблица 1. Химический состав зародыша пшеницы в расчёте на 100 г продукта

Наименование показатели	Chillaki, %	Kupova, %	Polovchanka, %	Andijon-1
Влажность,%	6,50	6,80	6,20	6,50
Белок,%	22,20	22,20	22,20	21,50
Жир,%	12,45	12,05	13,25	12,20
Зольность,%	3,30	3,30	3,30	3,25
Пищевые волокна,%	2,33	2,33	2,33	2,35

Наименование показатели	Chillaki, %	Kupova, %	Polovchanka, %	Andijon-1
Углеводы, %	53,22	53,32	52,72	54,20
Энергетическая ценность, ккал /100 гр	413,8	410,5	408,1	412,6

Как видно из таблицы 1, зародыш пшеницы может служить важным источником белков и липидов. Содержание белка в его составе позволяет повысить общее количество белка в продукте. Липиды, в свою очередь, могут влиять на энергетическую ценность, вкус и текстуру продукта. Вместе с тем высокое содержание жиров повышает риск окислительных процессов при хранении.

Зародыш пшеницы также содержит токоферолы, фитостеролы, некоторые витамины и минеральные вещества. Эти соединения являются компонентами, повышающими его пищевую ценность. Однако фактическое содержание данных веществ в готовом продукте зависит от доли добавляемого зародыша, условий переработки сырья и изменений, происходящих в процессе выпечки.

В таблице 2 представлены данные о содержании масла в зерне и зародыше пшеницы, полученных из сортов «Chillaki», «Kupova» и «Polovchanka».

Таблица 2. Содержание масла в зерне и зародыше пшеницы, полученных из сортов «Chillaki», «Kupova» и «Polovchanka»

Сорта пшеницы	Содержание масла, %	
	В зерне	В зародыше
Chillaki	1,6-1,7	12,3-12,6
Kupava	1,8-1,9	11,8-12,3
Polovchanka	1,9-2,0	13,1-13,4
Andijon-1	1,7-1,85	12,1-12,3

Как видно из таблицы 2, содержание масла в зерне и зародыше пшеницы незначительно зависит от сорта местной пшеницы, а полученные значения близки друг к другу. Так, установлено, что зародыши пшеницы сорта «Chillaki» содержат 12,3–12,6 % масла от массы зародышей, сорта «Kupova» — 11,8–12,3 %, сорта «Polovchanka» — 13,1–13,4 %, а сорта «Andijon-1» — 12,1–12,3 %.

Добавление зародыша пшеницы в мучные кондитерские изделия является одним из перспективных направлений повышения их пищевой ценности. Выбор печенья в качестве объекта исследования объясняется относительной технологической простотой его производства, возможностью изменения рецептурного состава и сопоставления показателей качества готовой продукции.

В ходе исследований обезжиренный зародыш пшеницы изучали в составе печенья при различных размерах частиц и дозировках добавления 5, 10 и 15 %. Авторы отмечают, что введение зародыша влияет на содержание белков, жиров, минеральных веществ и пищевых волокон. В определённых условиях размер частиц и влажность теста также оказывали влияние на твёрдость печенья [11].

Полученные результаты обосновывают возможность использования зародыша пшеницы при производстве печенья. Однако состав обезжиренного и натурального жиросодержащего зародыша пшеницы различается. Поэтому результаты, полученные в других исследованиях, нельзя напрямую переносить на необработанный зародыш или зародыш, подготовленный с использованием иной технологической обработки.

Для производства печенья рекомендуется первоначально сравнить контрольный образец с вариантами, в которых 5, 10 и 15 % пшеничной муки заменяют мукой из зародышей пшеницы. При необходимости можно также исследовать вариант с 20 %-ной заменой. При этом остальные компоненты рецептуры следует по возможности сохранять неизменными, а необходимость корректировки влажности теста необходимо фиксировать отдельно.

Заключение

Результаты исследования показывают, что зародыш пшеницы является перспективным сырьём, которое может использоваться для повышения пищевой ценности мучных кондитерских изделий. Среди изученных сортов пшеницы наибольшее содержание масла в зародыше отмечено у сорта «Polovchanka» — 13,1–13,4 %, а наименьшее — у сорта «Kupova» — 11,8–12,3 %. У сорта «Chillaki» данный показатель составил 12,3–12,6 %, а у сорта «Andijon-1» — 12,1–12,3 %.

Полученные данные свидетельствуют о том, что содержание масла в зародыше пшеницы варьируется в зависимости от сортовых особенностей. Согласно литературным данным, зародыш пшеницы является источником белков, липидов, минеральных веществ и пищевых волокон. В связи с этим его использование в составе мучных кондитерских изделий позволяет обогатить их питательный состав.

В целом исследование обосновывает наличие сортовых различий в содержании масла в зародыше пшеницы и подтверждает, что он представляет собой вторичное зерновое сырьё, представляющее научный интерес с точки зрения обогащения мучных кондитерских изделий питательными веществами.

Список литературы

1. FAO. FAO Cereal Supply and Demand Brief [Электронный ресурс]. // Food and Agriculture Organization of the United Nations: official website. – 2026. URL: https://www.fao.org/worldfoodsituation/csdb (accessed: 06.11.2026).
2. Katamadze A., Vergara-Díaz O., Uberegui E. et al. Evolution of wheat architecture, physiology, and metabolism during domestication and further cultivation: Lessons for crop improvement // The Crop Journal. – 2023. – T. 11, № 4. – P. 1080–1096. – DOI: 10.1016/j.cj.2023.06.006.\.
3. FAO. Food balance sheets 2010–2023 [Электронный ресурс]. // Food and Agriculture Organization of the United Nations: официальный сайт. – 2025. URL: https://www.fao.org/statistics/highlights-archive/highlights-detail/food-balance-sheets-2010-2023/ (дата обращения: 06.11.2026).
4. Cardoso R.V. C. Fernandes Â., Pinela J., et al. Valorization of Cereal By-Products from the Milling Industry as a Source of Nutrients and Bioactive Compounds to Boost Resource-Use Efficiency // Agronomy. – 2021. – T. 11, № 5. – Art. 972. – DOI: 10.3390/agronomy11050972.

5. Galanakis C.M. Sustainable Applications for the Valorization of Cereal Processing By-Products // Foods. – 2022. – T. 11, № 2. – Art. 241. – DOI: 10.3390/foods11020241.
6. Alzuwaid N.T., Sissons M., Laddomada B., Fellows C.M. Nutritional and functional properties of durum wheat bran protein concentrate // Cereal Chemistry. – 2020. – T. 97, № 2. – P. 304–315. – DOI: 10.1002/cche.10246.
7. Khalid A., Hameed A., Tahir M.F. Wheat quality: A review on chemical composition, nutritional attributes, grain anatomy, types, classification, and function of seed storage proteins in bread making quality // Frontiers in Nutrition. – 2023. – T. 10. – Art. 1053196. – DOI: 10.3389/fnut.2023.1053196.
8. Teterycz D., Sobota A., Starek A. Possibility of using wheat germ and wheat germ protein isolate for high-protein pasta production // Cereal Chemistry. – 2023. – T. 100, № 2. – P. 299–309. – DOI: 10.1002/cche.10602.
9. Siraj N. Wheat germ oil: a comprehensive review // Food Science and Technology. – 2022. – T. 42. – DOI: 10.1590/fst.113721.
10. Kublicki M., Koszelewski D., Brodzka A., Ostaszewski R. Wheat germ lipase: isolation, purification and applications // Critical Reviews in Biotechnology. – 2022. – T. 42, № 2. – P. 184–200. – DOI: 10.1080/07388551.2021.1939259.
11. Petrović J. et al. Defatted wheat germ application: Influence on cookies' properties with regard to its particle size and dough moisture content // Food Science and Technology International. – 2017. – T. 23, № 7. – P. 597–607. – DOI: 10.1177/1082013217713101.

Статья поступила в редакцию: 01.10.2026
Статья принята к публикации: 08.10.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 664.8+66.047.3+519.87

Влияние частоты и амплитуды вибрации на продолжительность сушки и удельный расход энергии при виброконвективной сушке чеснока (расчётное исследование)

Миркомилов Абдурахмон Мираббос угли
PhD
Ташкентский химико-технологический институт
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: hamroyevr@mail.ru

Effect of vibration frequency and amplitude on drying time and specific energy consumption during vibro-convective drying of garlic (a computational study)

Mirkomilov Abdurakhmon Mirabbos ugli
PhD
Tashkent Institute of Chemical Technology
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

На основе обобщённой математической модели тепломассопереноса при виброконвективной сушке с учётом усадки и виброускорения выполнено расчётное исследование влияния частоты (10–30 Гц) и амплитуды (0,25–2 мм) колебаний виброподдона на продолжительность сушки ломтиков чеснока и относительные удельные энергозатраты. Показано, что при принятых допущениях определяющим параметром является безразмерное виброускорение $\Gamma = A(2\pi f)^2/g$: одинаковым Γ при разных сочетаниях f и A соответствует одинаковая продолжительность сушки. Продолжительность сушки монотонно снижается с ростом Γ с убывающей отдачей (со 162 мин при $\Gamma = 0$ до 133 мин при $\Gamma = 1$ и 120 мин при $\Gamma = 3$), а удельные энергозатраты имеют минимум в области $\Gamma = 0{,}5–1{,}0$, что соответствует, например, $f = 15–20$ Гц при $A = 0{,}5$ мм или $f = 10–15$ Гц при $A = 1$ мм. Построены карты продолжительности сушки и энергозатрат в координатах «частота – амплитуда» для выбора рабочей области виброконвективной установки.

Abstract

Based on the generalized mathematical model of heat and mass transfer in vibro-convective drying accounting for shrinkage and vibration acceleration, a computational study of the effect of the vibration frequency (10–30 Hz) and amplitude (0.25–2 mm) of the vibrating tray on the drying

Библиографическое описание: Миркомилов А.М.У. Влияние частоты и амплитуды вибрации на продолжительность сушки и удельный расход энергии при виброконвективной сушке чеснока (расчётное исследование) // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23519

time of garlic slices and the relative specific energy consumption was performed. It is shown that, under the adopted assumptions, the governing parameter is the dimensionless vibration acceleration $\Gamma = A(2\pi f)^2/g$: equal Γ at different combinations of f and A gives equal drying time. The drying time decreases monotonically with Γ with diminishing returns (from 162 min at $\Gamma = 0$ to 133 min at $\Gamma = 1$ and 120 min at $\Gamma = 3$), while the specific energy consumption has a minimum in the range $\Gamma = 0.5–1.0$, which corresponds, for example, to $f = 15–20$ Hz at $A = 0.5$ mm or $f = 10–15$ Hz at $A = 1$ mm. Maps of drying time and energy consumption in the frequency–amplitude coordinates are constructed for selecting the operating region of a vibro-convective dryer.

Ключевые слова: виброконвективная сушка, чеснок, частота вибрации, амплитуда, виброускорение, продолжительность сушки, удельные энергозатраты, математическая модель.

Keywords: vibro-convective drying, garlic, vibration frequency, amplitude, vibration acceleration, drying time, specific energy consumption, mathematical model.

Введение

Вибрационное воздействие на слой высушиваемого материала интенсифицирует тепломассообмен за счёт усиления перемешивания частиц и уменьшения толщины пограничного слоя, причём, как показано экспериментально, определяющими параметрами являются виброускорение и отношение амплитуды к частоте колебаний [3, 4]; для вибропсевдоожиженной сушки семян установлен оптимум интенсивности вибрации [5]. Для сушки чеснока в Ташкентском химико-технологическом институте разработана энергосберегающая виброконвективная установка и определены оптимальные параметры процесса [9, 10], однако вопрос о рациональном сочетании частоты f и амплитуды A колебаний виброподдона, которые в конструкции могут выбираться независимо, требует отдельного рассмотрения: при одном и том же виброускорении возможны различные сочетания f и A, а мощность вибропривода растёт с их увеличением. Цель работы — на основе обобщённой модели тепломассопереноса при виброконвективной сушке [1] построить карты продолжительности сушки и относительных удельных энергозатрат в координатах «частота – амплитуда» и определить рациональную рабочую область.

Методика расчёта

Использована обобщённая математическая модель [1], в которой ломтик чеснока рассматривается как пластина с подвижной (усаживающейся) границей, влагоперенос описывается уравнением эффективной диффузии в нормированной координате $\xi = z/L(t)$, температура ломтика — сосредоточенным тепловым балансом с учётом испарительного охлаждения, а влияние вибрации — множителем $(1 + a\Gamma^{*n*})$ к коэффициентам внешнего тепло- и массообмена, где безразмерное виброускорение

$$\Gamma = \frac{A(2\pi f)^2}{g}, \qquad (1)$$

A — амплитуда колебаний, м; f — частота, Гц; g — ускорение свободного падения. Параметры модели приняты по [1]: L_0 = 1,5 мм, X_0 = 1,6 кг/кг, X_f = 0,08 кг/кг, D_{eff}(60 °C) = $4{,}0\cdot10^{-10}$ м²/с, E_a = 25 кДж/моль, k_{sh} = 0,45, Bi_{m0} = 2,5, a = 0,4, n = 0,5; порядок величины D_{eff} и E_a соответствует данным для чеснока [7, 2]. Режим агента сушки: T_a = 60 °C (верхняя граница диапазона сохранности аллицина [6]), v = 2 м/с. Численная схема модели верифицирована по аналитическому решению Крэнка с отклонением не более 0,09 % [1]. Относительные удельные энергозатраты рассчитывались по соотношению

$$\frac{SEC(\Gamma)}{SEC(0)} = \frac{\tau_d(\Gamma)}{\tau_d(0)}\left(1 + \kappa_v\Gamma^2\right), \qquad (2)$$

где τ_d — продолжительность сушки до X_f; κ_v — отношение мощности вибропривода при Γ = 1 к суммарной мощности калорифера и вентилятора (принято κ_v = 0,1; влияние оценено при 0,05 и 0,2). Квадратичная зависимость мощности вибропривода от Γ при фиксированной частоте следует из пропорциональности диссипируемой мощности квадрату амплитуды колебательной скорости [8]. Продолжительность сушки рассчитана на сетке Γ = 0–8 и интерполирована на сетку сочетаний f = 10; 15; 20; 25; 30 Гц и A = 0,25; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 мм, охватывающую рабочие диапазоны виброподдонов пищевых сушилок [8].

Результаты и обсуждение

Зависимость продолжительности сушки от виброускорения (рис. 1, а) имеет вид кривой насыщения: при Γ = 0 (конвективная сушка) τ_d = 162,2 мин, при Γ = 0,5 — 139,7 мин (−13,9 %), при Γ = 1 — 133,0 мин (−18,0 %), при Γ = 3 — 120,2 мин (−25,9 %), при Γ = 8 — 107,6 мин (−33,7 %). Убывающая отдача объясняется двумя причинами: степенной формой множителя интенсификации с n < 1 и переходом процесса по мере роста коэффициента внешнего влагообмена в область, лимитируемую внутренней диффузией (массообменное число Био возрастает с 2,5 при Γ = 0 до 4,2 при Γ = 3), где дальнейшая интенсификация внешнего переноса не влияет на скорость сушки. Относительные удельные энергозатраты (рис. 1, б) имеют минимум: при κ_v = 0,1 он равен 0,88 при Γ = 0,5–1, при κ_v = 0,05 — 0,86 при Γ = 1, при κ_v = 0,2 — 0,90 при Γ = 0,5; при Γ ≥ 2 рост мощности вибропривода перекрывает выигрыш от сокращения времени, и энергозатраты превышают конвективный уровень.

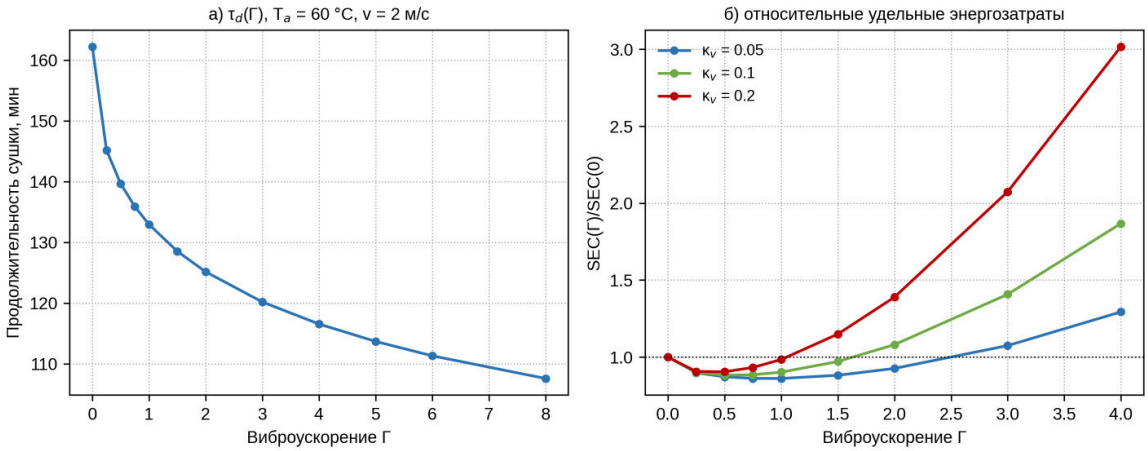


Рисунок 1. Продолжительность сушки (а) и относительные удельные энергозатраты (б) в зависимости от виброускорения; Ta = 60 °C, v = 2 м/с

Значения виброускорения для сочетаний частоты и амплитуды приведены в табл. 1, а соответствующие продолжительности сушки и энергозатраты — в табл. 2 и на картах рис. 2. Поскольку в модели вибрация входит только через Г, сочетания с одинаковым виброускорением дают одинаковые результаты: например, f = 20 Гц при A = 0,5 мм и f = 10 Гц при A = 2 мм (Г ≈ 0,8) обеспечивают τ_d ≈ 135,3 мин; f = 15 Гц при A = 1 мм и f = 30 Гц при A = 0,25 мм (Г ≈ 0,9) — τ_d ≈ 134,1 мин. Это означает, что при проектировании вибропривода частота и амплитуда могут выбираться из конструктивных соображений (резонансные характеристики упругих опор, износ, шум) при сохранении требуемого Г. Рабочая область минимальных энергозатрат (SEC/SEC(0) ≤ 0,90, выделена зелёным на рис. 2, б) ограничена Г ≈ 0,4–1,3 и включает сочетания f = 15–30 Гц при A = 0,25 мм, f = 10–20 Гц при A = 0,5 мм и f = 10–15 Гц при A = 1 мм; сочетания с A ≥ 1,5 мм при f ≥ 20 Гц (Г > 3) приводят к росту энергозатрат в 1,5–4 раза при выигрыше во времени лишь 10–17 % относительно Г = 1.

Таблица 1. Виброускорение Г = A(2πf)²/g для сочетаний частоты и амплитуды колебаний

A, мм \ f, Гц	**10**	**15**	**20**	**25**	**30**
0,25	0,10	0,23	0,40	0,63	0,91
0,5	0,20	0,45	0,80	1,26	1,81
1	0,40	0,91	1,61	2,52	3,62
1,5	0,60	1,36	2,41	3,77	5,43
2	0,80	1,81	3,22	5,03	7,24

Таблица 2. Расчётная продолжительность сушки τd, мин (числитель) и относительные удельные энергозатраты SEC(Г)/SEC(0) при κv = 0,1 (знаменатель); Ta = 60 °C, v = 2 м/с

A, мм \ f, Гц	**10**	**15**	**20**	**25**	**30**
0,25	155,4 / 0,96	146,8 / 0,91	141,8 / 0,89	137,7 / 0,88	134,1 / 0,89
0,5	148,5 / 0,92	140,7 / 0,89	135,3 / 0,89	130,7 / 0,93	126,4 / 1,03
1	141,8 / 0,89	134,1 / 0,89	127,8 / 0,99	122,6 / 1,23	117,9 / 1,68
1,5	138,1 / 0,88	129,8 / 0,95	123,1 / 1,20	117,4 / 1,75	112,7 / 2,74
2	135,3 / 0,89	126,4 / 1,03	119,4 / 1,50	113,6 / 2,47	109,0 / 4,20

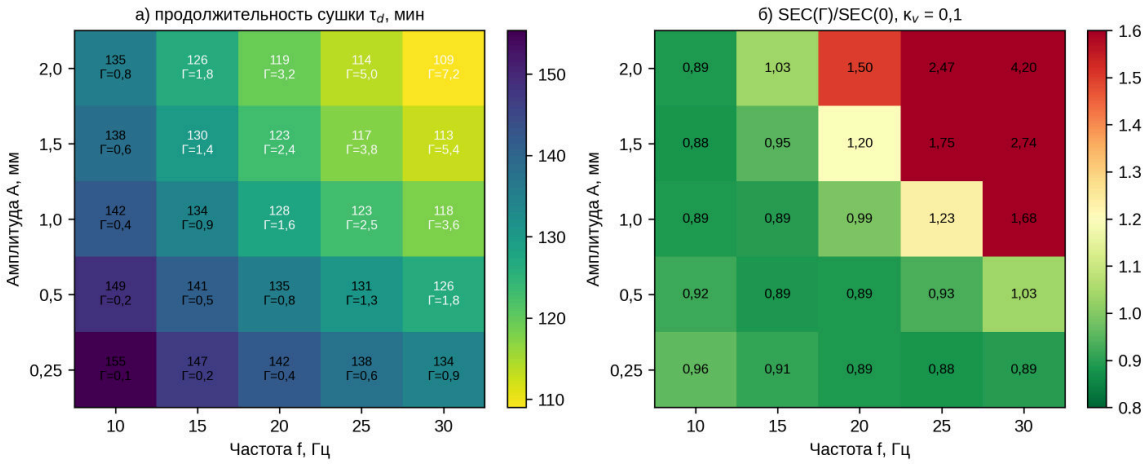


Рисунок 2. Карты продолжительности сушки (а) и относительных удельных энергозатрат (б) в координатах «частота – амплитуда» колебаний виброподдона; в ячейках карты (а) указано также виброускорение Г

Полученные карты имеют расчётный характер: параметры вибрационной интенсификации a и n приняты ориентировочно по качественным выводам [3, 4] и подлежат идентификации по экспериментальным кривым сушки при различных f и A на виброконвективной установке [9, 10]. Вместе с тем качественные закономерности — подобие режимов по Г, убывающая отдача от роста виброускорения и наличие энергетического оптимума при Г ≈ 0,5–1 — определяются структурой модели и согласуются с известным для вибрационных сушилок положением о нецелесообразности виброускорений, существенно превышающих ускорение свободного падения [8], и с экспериментально найденным оптимумом интенсивности вибрации при сушке семян [5]. Следует также учитывать, что при высоких частотах и малых амплитудах (A < 0,25 мм) допущение о подобии по Г может нарушаться из-за проскальзывания слоя и упругих деформаций поддона, а при больших амплитудах — из-за подбрасывания ломтиков (Г > 1), что требует экспериментальной проверки границ применимости модели.

Выводы

1. При принятых допущениях частота и амплитуда колебаний влияют на кинетику виброконвективной сушки чеснока только через безразмерное виброускорение $\Gamma = A(2\pi f)^2/g$; сочетания f и A с одинаковым Г эквивалентны по продолжительности сушки и энергозатратам.

2. Продолжительность сушки снижается с ростом Г с убывающей отдачей: на 18 % при Г = 1 и на 26 % при Г = 3 относительно конвективной сушки; удельные энергозатраты минимальны (снижение на 10–14 %) при Г = 0,5–1 и превышают конвективный уровень при Г ≥ 2.

3. Рациональная рабочая область виброконвективной установки для сушки ломтиков чеснока при 60 °С: f = 10–20 Гц при A = 0,5 мм, f = 10–15 Гц при A = 1 мм или f = 15–30 Гц при A = 0,25 мм; окончательный выбор f и A внутри области определяется конструктивными требованиями к виброприводу и упругим опорам.

4. Построенные карты являются основой для планирования экспериментов по идентификации параметров вибрационной интенсификации и проверки границ подобия по Г.

Список литературы

1. Миркомилов А.М. Обобщённая математическая модель тепломассопереноса при виброконвективной сушке с учётом усадки и виброускорения // (статья направлена в печать). – 2026.
2. Сафаров Ж.Э., Султанова Ш.А., Гунеш Г., Понасенко А.С., Самандаров Д.И., Пулатов М.М., Миркомилов А.М., Насирова М.А. Исследование эффективного коэффициента диффузии и энергии активации с целью энергосбережения при конвекционной сушке // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2025. – Т. 68, № 1. – С. 58–75.
3. De Munck M.J.A. et al. Experimental study on vibrating fluidized bed solids drying [Электронный ресурс]. // Chemical Engineering Journal. – 2023. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894723035404 (дата обращения: 05.10.2026).
4. De Munck M.J.A., Marrevee D.P.F., Peters E.A.J.F., Kuipers J.A.M. Experimental study on binary solids drying in a vibro-fluidized bed // Powder Technology. – 2024. – T. 435. – Art. 119437.
5. Dhurve P., Tarafdar A., Arora V.K. Vibro-fluidized bed drying of pumpkin seeds: assessment of mathematical and artificial neural network models for drying kinetics // Journal of Food Quality. – 2021. – Art. 7739732.
6. Doganturk M., Demiray E., Gursoy O., Yilmaz Y. Kinetics of allicin potential loss in garlic slices during convective drying // Quality Assurance and Safety of Crops & Foods. – 2019. – T. 11, № 3. – P. 211–220.
7. Madamba P.S., Driscoll R.H., Buckle K.A. The thin-layer drying characteristics of garlic slices // Journal of Food Engineering. – 1996. – T. 29, № 1. – P. 75–97.
8. Pakowski Z., Mujumdar A.S., Strumillo C. Theory and application of vibrated beds and vibrated fluid beds for drying processes // Advances in Drying / ed. A.S. Mujumdar. – 1984. – T. 3. – P. 245–306.
9. Safarov J.E., Sultanova Sh.A., Mirkomilov A.M. Energy saving technology for drying garlic (Allium sativum) // Technical science and innovation. – 2024. – № 4. – P. 10–14.
10. Safarov J.E., Sultanova Sh.A., Mirkomilov A.M. Determination of optimal parameters for quality drying of garlic using the vibroconvective method // Chemical technology, control and management. – 2025. – № 2 (122). – P. 9–18.

References

1. Mirkomilov A.M. [Generalized mathematical model of heat and mass transfer during vibro-convective drying taking into account shrinkage and vibration acceleration] // (stat'ya napravlena v pechat'). – 2026. (In Russ.).
2. Safarov Zh.E., Sultanova Sh.A., Gunesh G., Ponasenko A.S., Samandarov D.I., Pulatov M.M., Mirkomilov A.M., Nasirova M.A. [Investigation of the effective diffusion coefficient and activation energy for energy saving in convective drying] // Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij i energeticheskikh ob«edinenij CIS. – 2025. – Vol. 68, No. 1. (In Russ.).

3. De Munck M.J.A. et al. Experimental study on vibrating fluidized bed solids drying [Электронный ресурс]. // Chemical Engineering Journal. – 2023. – URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894723035404 (accessed: 05.10.2026).
4. De Munck M.J.A., Marrevee D.P.F., Peters E.A.J.F., Kuipers J.A.M. Experimental study on binary solids drying in a vibro-fluidized bed // Powder Technology. – 2024. – Vol. 435. – Art. 119437.
5. Dhurve P., Tarafdar A., Arora V.K. Vibro-fluidized bed drying of pumpkin seeds: assessment of mathematical and artificial neural network models for drying kinetics // Journal of Food Quality. – 2021. – Art. 7739732.
6. Doganturk M., Demiray E., Gursoy O., Yilmaz Y. Kinetics of allicin potential loss in garlic slices during convective drying // Quality Assurance and Safety of Crops & Foods. – 2019. – Vol. 11, No. 3. – P. 211–220.
7. Madamba P.S., Driscoll R.H., Buckle K.A. The thin-layer drying characteristics of garlic slices // Journal of Food Engineering. – 1996. – Vol. 29, No. 1. – P. 75–97.
8. Pakowski Z., Mujumdar A.S., Strumillo C. Theory and application of vibrated beds and vibrated fluid beds for drying processes // Advances in Drying / ed. A.S. Mujumdar. – 1984. – Vol. 3. – P. 245–306.
9. Safarov J.E., Sultanova Sh.A., Mirkomilov A.M. Energy saving technology for drying garlic (Allium sativum) // Technical science and innovation. – 2024. – No. 4. – P. 10–14.
10. Safarov J.E., Sultanova Sh.A., Mirkomilov A.M. Determination of optimal parameters for quality drying of garlic using the vibroconvective method // Chemical technology, control and management. – 2025. – No. 2 (122). – P. 9–18.

Статья поступила в редакцию: 22.10.2026
Статья принята к публикации: 27.10.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 637.344

Исследование физико-химических показателей и микробиологической безопасности лактозы, полученной из вторичного молочного сырья

Облобердиев Сардор Нормамат угли
PhD по техн. наукам, доц. кафедры пищевых технологий, Янгиерский филиал Ташкентского химико-технологического института
Республика Узбекистан, г. Янгиер

Хамзалиев Мухаммаджон Абдуназар угли
магистрант
Янгиерский филиал Ташкентского химико-технологического института
Республика Узбекистан, г. Янгиер
ORCID: https://orcid.org/0009-0005-2537-3502
E-mail: muhammadshaxabdunazarovichhamz@gmail.com

Investigation of physicochemical parameters and microbiological safety of lactose recovered from dairy by-products

Obloberdiev Sardor Normamat ugli
PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Department of Food Technologies, Yangiyer Branch of the Tashkent Institute of Chemical Technology
Republic of Uzbekistan, Yangiyer

Khamzaliev Mukhammadjon Abdunazar ugli
Master's Student Yangiyer Branch of Tashkent Institute of Chemical Technology
Republic of Uzbekistan, Yangiyer

Аннотация

Цель исследования, разработать согласованную схему оценки физико-химического качества и микробиологической безопасности лактозы, выделяемой из молочной сыворотки. Применены анализ научной и нормативной литературы, разбор видов и последствий потенциальных несоответствий и сопоставление технологических барьеров. Рассмотрены подготовка сырья, удаление белковых и минеральных примесей, кристаллизация, отделение кристаллов, сушка и упаковка. Результатом служит схема контрольных точек, в которой химическая чистота и санитарная характеристика продукта оцениваются независимо. Показано, что высокий выход кристаллов не свидетельствует о микробиологической безопасности, а низкая влажность не подтверждает отсутствие жизнеспособных

Библиографическое описание: Облобердиев С.Н.У., Хамзалиев М.А.У. Исследование физико-химических показателей и микробиологической безопасности лактозы, полученной из вторичного молочного сырья // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23684

микроорганизмов. Разграничены массовая доля воды и активность воды, выход сухого продукта и извлечение собственно лактозы. Предложен порядок расчёта извлечения с поправкой на влажность и чистоту; условный пример не представляет производственного испытания. Сформулированы рекомендации по выбору аналитических методов и регистрации пределов обнаружения. Работа носит обзорно-методический характер и не устанавливает соответствие конкретной партии обязательным требованиям. Практическое назначение разработки состоит в подготовке исследований вторичного молочного сырья на базе вузов и перерабатывающих предприятий Узбекистана с учётом назначения конечного продукта и применимых документов.

Abstract

The study develops an integrated framework for evaluating the physicochemical quality and microbiological safety of lactose recovered from whey. Scientific and standards-based literature was analysed using failure modes and effects analysis together with a process-barrier assessment. Feedstock preparation, removal of protein and mineral impurities, crystallisation, crystal separation, drying and packaging are considered. The outcome is a control-point scheme in which chemical purity and microbiological status are assessed independently. High crystal yield does not establish microbiological safety, and low moisture does not demonstrate the absence of viable microorganisms. Water content is distinguished from water activity, and dry-product yield from lactose recovery. A calculation procedure corrects recovery for moisture and purity; its illustrative example does not represent a production trial. Recommendations address analytical-method selection and reporting of detection limits. The work is methodological and does not establish regulatory compliance for a particular batch. It supports investigations of dairy by-products in universities and processing enterprises in Uzbekistan while considering intended product use and applicable requirements.

Ключевые слова: лактоза, молочная сыворотка, кристаллизация, активность воды, микробиологическая безопасность, FMEA.

Keywords: lactose, whey, crystallisation, water activity, microbiological safety, FMEA.

Введение

Молочная сыворотка содержит ценные компоненты, извлечение которых уменьшает потери сырья, но требует контроля технологических примесей и санитарного состояния [3; 2; 9]. Лактоза из вторичного сырья не становится безопасной вследствие одной кристаллизации. Цель работы - согласовать материальный баланс её извлечения с независимой оценкой качества конечного продукта.

Материалы и методы

Проведён анализ литературных описаний переработки сыворотки и кристаллизации [2; 4; 8; 9; 10]. За организационную основу принят анализ видов и последствий отказов FMEA [5], дополненный проверкой барьеров на каждой стадии. Для возможного несоответствия указывают причину, последствие, способ обнаружения и действие. Числовые оценки риска не назначаются без производственной статистики и заранее определённых шкал.

ГОСТ 33567–2015 использован как источник технических характеристик молочного сахара [1], без предположения об автоматической обязательности его применения в Узбекистане. Выбор нормативов зависит от назначения продукта. Для микробиологической части рассматриваются горизонтальные методы подсчёта микроорганизмов и дрожжей с плесенями [6; 7]. Их область применимости, подготовку пробы и предел обнаружения необходимо согласовать с матрицей; универсального метода подтверждения всей безопасности не существует.

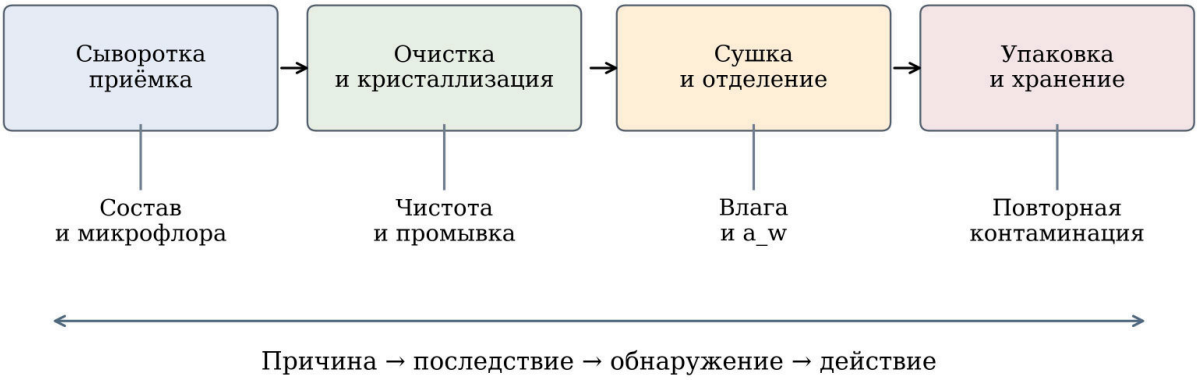


Рисунок 1. Анализ барьеров качества и безопасности при получении лактозы

Результаты и обсуждение

Основной результат анализа - разделение технологического извлечения, состава и безопасности. Содержание воды определяет массовый баланс, тогда как активность воды характеризует её доступность для процессов; эти величины не взаимозаменяемы. Сушка ограничивает рост части микрофлоры, но не равнозначна стерилизации. Условия хранения способны вызвать слёживание и изменение состояния лактозы [8; 10].

Таблица 1. Потенциальные несоответствия и средства их обнаружения

Стадия	Несоответствие	Показатель	Действие
Очистка	Остаток белка и солей	Белок, зольность	Уточнить очистку
Кристаллиза-ция	Захват маточного раствора	Чистота кристаллов	Проверить промывку
Сушка	Недостаточное обезвоживание	Влага и a_w	Проверить режим
Упаковка	Повторная контаминация	Микробное число	Проверить санитарные барьеры

Извлечение рассчитывают как η = 100mкр(1 − w)P/mл,$_0$, где mкр – масса кристаллов, w – доля удаляемой влаги, P – доля лактозы на согласованной сухой основе, mл,$_0$ – исходная масса лактозы. При условных 3,0 кг кристаллов, w = 0,01, P = 0,98 и mл,$_0$ = 4,5 кг получают η = 64,68 %. Основа выражения лактозы, включая учёт кристаллизационной воды, должна совпадать в числителе и знаменателе. Пример расчётный; показатель безопасности из него не выводится. Микробиологическое заключение требует установленного плана отбора проб и контроля значимых для назначения продукта микроорганизмов.

Заключение

Для исследований при вузах и молокоперерабатывающих предприятиях Узбекистана целесообразен единый журнал материального баланса и раздельный протокол санитарного контроля. FMEA связывает возможное несоответствие с обнаружением и действием. Выход, химическая чистота и микробиологическая безопасность должны оставаться самостоятельными основаниями решения о пригодности лактозы.

Список литературы

1. ГОСТ 33567-2015. Сахар молочный. Технические условия: межгосударственный стандарт: издание официальное: введ. 2016-07-01. – Москва: Стандартинформ, 2016. – 20 с.
2. Giulianetti de Almeida, M.P. Got Whey? Sustainability Endpoints for the Dairy Industry through Resource Biorecovery / M.P. Giulianetti de Almeida, G. Mockaitis, D.G. Weissbrodt // Fermentation. – 2023. – T. 9, № 10. – Art. 897. – DOI: 10.3390/fermentation9100897.
3. Храмцов, А.Г. Феномен молочной сыворотки / А.Г. Храмцов. – Санкт. – Петербург: Профессия, 2011. – 804 с.
4. R. Halfwerk, L. Verdonk, D. Yntema [et al.]. Scaling up continuous eutectic freeze crystallization of lactose from whey permeate: a pilot plant study at sub-zero temperatures // Food Research International. – 2023. – T. 168. – Art. 112764. – DOI: 10.1016/j.foodres. 2023.112764.
5. IEC 60812:2018. Failure modes and effects analysis (FMEA and FMECA): international standard. – Geneva: IEC, 2018. – 165 P.
6. ISO 21527-2:2008. Microbiology of food and animal feeding stuffs. Horizontal method for the enumeration of yeasts and moulds. Part 2. Colony count technique in products with water activity less than or equal to 0,95: international standard. – Geneva: ISO, 2008. – 9 P.
7. ISO 4833–1:2013. Microbiology of the food chain. Horizontal method for the enumeration of microorganisms. Part 1. Colony count at 30 °C by the pour plate technique: international standard. – Geneva: ISO, 2013.; Изменение 1: Clarification of scope (Amd 1:2022). – Geneva: ISO, 2022. – 16 P.
8. B. Ozel, D.J. Mc. Challenges in dried whey powder production: quality problems // Food Research International. – 2022. – T. 160. – Art. 111682. – DOI: 10.1016/j.foodres.2022.111682.

9. Walstra, P. Dairy Science and Technology / P. Walstra, J.T. M. Wouters, T.J. Geurts. – 2nd ed. – DOI. – Boca Raton: CRC Press, 2006. – 806 P. – DOI: 10.1201/9781420028010.
10. Wong, S.Y. Crystallization in Lactose Refining – A Review / S.Y. Wong, R.W. Hartel // Journal of Food Science. – 2014. – T. 79, № 3. – P. R257–R272. – DOI: 10.1111/1750–3841.12349.

References

1. GOST 33567–2015. [Milk sugar. Specifications. Moscow: Standartinform, 2016] (In Russ.).
2. Giulianetti de Almeida M.P., Mockaitis G., Weissbrodt D.G. [Got Whey? Sustainability Endpoints for the Dairy Industry through Resource Biorecovery] // Fermentation. – 2023. – Vol. 9, No. 10. – DOI: 10.3390/fermentation9100897. (In Russ.).
3. Khramtsov A.G. [The Phenomenon of Milk Whey]. – SPb.: Professiya, 2011. – 804 s (In Russ.).
4. Halfwerk R., Verdonk L., Yntema D. et al. Scaling up continuous eutectic freeze crystallization of lactose from whey permeate: A pilot plant study at sub-zero temperatures // Food Research International. – 2023. – Vol. 168. – DOI: 10.1016/j.foodres.2023.112764.
5. IEC 60812:2018. Failure modes and effects analysis (FMEA and FMECA). – Geneva: IEC, 2018.
6. ISO 21527-2:2008. Microbiology of food and animal feeding stuffs. Enumeration of yeasts and moulds. Part 2. – Geneva: ISO, 2008.
7. ISO 4833–1:2013. Microbiology of the food chain. Enumeration of microorganisms. Part 1. Amd 1:. – Geneva: ISO, 2022.
8. Ozel B. McClements D.J., Arikan C. et al. Challenges in dried whey powder production: Quality problems // Food Research International. – 2022. – Vol. 160. – DOI: 10.1016/j.foodres. 2022.111682.
9. Walstra P., Wouters J.T.M., Geurts T.J. Dairy Science and Technology. 2nd ed. – Boca Raton: CRC Press, 2006. – DOI: 10.1201/9781420028010.
10. Wong S.Y., Hartel R.W. Crystallization in Lactose Refining-A Review // Journal of Food Science. – 2014. – Vol. 79, No. 3. – P. R257–R272. – DOI: 10.1111/1750–3841.12349.

Статья поступила в редакцию: 11.11.2026
Статья принята к публикации: 18.11.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 665.345.4

DOI: 10.32743/UniTech.2026.152.11.23756

Комплексная оценка выхода масла и сохранения липидных компонентов при постадийном рафинировании льняного масла

Рузметова Дилдора Тулибаевна
д-р филос. (PhD) по техническим наукам, доц.
Ургенчский государственный университет имени Абу Райхана Беруни
Республика Узбекистан, г. Ургенч
E-mail: ruzmetovadildora2018@gmail.com
Салиханова Дилноза Саидакбаровна
д-р техн. наук (DSc), проф.; гл. науч. сотр.; Институт общей и неорганической химии
Академия наук Республики Узбекистан
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: dilnozakhon79@gmail.com
Абдурахимов Ахрор Анварович
д-р техн. наук (DSc)
проф., проф., Ташкентский химико-технологический институт
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: ahror.abdurakhimov1986@gmail.com
Ходжаев Сарвар Фехритдинович
д-р техн. наук (DSc)
доц., доц., Ташкентский химико-технологический институт
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: sarvarkh1993@gmail.com

Comprehensive assessment of oil yield and retention of lipid components during stepwise refining of flaxseed oil

Ruzmetova Dildora Tulibaevna
doctor of Philosophy (PhD)
in technical sciences, Associate Professor, Urgench State University named after Abu Rayhan Beruni
Republic of Uzbekistan, Urgench
Salikhanova Dilnoza Saidakbarovna
Dr. Tech. Science (DSc), prof.; Ch. scientific coll.; Institute of General and Inorganic Chemistry of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan
Republic of Uzbekistan, Tashkent
Abdurakhimov Akhror Anvarovich
Dr. Tech. Sciences (DSc), prof., prof., Tashkent Institute of Chemical Technology
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Библиографическое описание: Комплексная оценка выхода масла и сохранения липидных компонентов при постадийном рафинировании льняного масла // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Рузметова Д.Т. [и др.]. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23756

Khodjaev Sarvar Fekhritdinovich
Dr. Tech. Sciences (DSc), Associate Professor
Assoc., Tashkent Institute of Chemical Technology
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

Цель исследования – комплексно оценить выход продукта и изменения пищевых липидных компонентов на последовательных стадиях щелочной нейтрализации, адсорбционной отбелки и дезодорации льняного масла. Проведён сравнительный анализ экспериментальных показателей масел холодного и горячего прессования, а также экстракционного масла. Рассмотрены концентрация гидроксида натрия и избыток щёлочи при нейтрализации, дозировка адсорбента Super FF при отбелке, а также относительная доля α-линоленовой кислоты, концентрация токоферолов, содержание двух определённых транс-изомеров и 11 выбранных летучих соединений на различных стадиях. Профиль жирных кислот оценивали по результатам ГХ-ПИД, токоферолы – по результатам ВЭЖХ. При увеличении избытка NaOH с 20 до 100 % выход масла горячего прессования снизился с 98,77 до 96,97 %, а экстракционного масла – с 97,92 до 94,93 %. В ходе полного рафинирования относительная доля α-линоленовой кислоты снизилась соответственно с 51,49 до 46,50 % и с 50,26 до 45,24 %. Конечная концентрация токоферолов составила 39,7 и 34,9 % от исходной. Описательная линейная аппроксимация выхода по пяти уровням избытка щёлочи дала R^2 = 0,995 для горячепрессового и 0,900 для экстракционного масла; отсутствие данных о повторах не позволяет судить о статистической значимости. Для обоснования технологических решений необходим совместный постадийный контроль выхода масла, цветности, жирнокислотного профиля и токоферолов.

Abstract

Objective. To comprehensively assess product yield and changes in nutritionally relevant lipid components during consecutive alkaline neutralization, adsorptive bleaching, and deodorization of flaxseed oil. Methods. Previously unpublished experimental measurements of cold-pressed, hot-pressed, and solvent-extracted flaxseed oils were analyzed comparatively. The effects of sodium hydroxide concentration and excess alkali during neutralization and the dose of Super FF adsorbent during bleaching were considered alongside the relative proportion of α-linolenic acid, tocopherol concentrations, two identified trans-isomers, and 11 selected volatile compounds. Fatty acid profiles were based on gas chromatography with flame ionization detection, whereas tocopherols were determined using high-performance liquid chromatography. Results. Increasing excess NaOH from 20 % to 100 % reduced the yield of hot-pressed oil from 98.77 % to 96.97 % and solvent-extracted oil from 97.92 % to 94.93 %. During the complete refining sequence, the relative proportion of α-linolenic acid declined from 51.49 % to 46.50 % and from 50.26 % to 45.24 %, respectively. Final tocopherol concentrations amounted to 39.7 % and 34.9 % of the initial concentrations. The largest observed changes in selected trans-isomers occurred during deodorization. Conclusion. Descriptive linear fits of yield against excess NaOH produced R^2 values of 0.995 and 0.900, respectively; inferential testing was precluded by the absence of replicate measurements. Refining conditions should be evaluated by jointly considering oil yield, color, fatty acid composition, and tocopherol

concentrations rather than optimizing a single parameter. Practical significance. The proposed stage-specific monitoring framework helps identify quality-yield trade-offs; a complete mass balance is still needed before establishing an industrial optimum.

Ключевые слова: льняное масло, щелочная нейтрализация, адсорбционная отбелка, дезодорация, α-линоленовая кислота, токоферолы, многокритериальная оценка.

Keywords: flaxseed oil, alkaline neutralization, adsorptive bleaching, deodorization, α-linolenic acid, tocopherols, multicriteria assessment.

Финансирование: исследование выполнено за счёт личных средств основного автора, без внешнего финансирования.

Funding: This study received no external funding and was supported by the lead author’s personal funds.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

Благодарности: Использование искусственного интеллекта. ChatGPT (OpenAI) использовался для структурирования данных и перевода рукописи с узбекского на русский язык, а также для подготовки англоязычных метаданных. Научные результаты и окончательное содержание подтверждены авторами.

Acknowledgements: Use of artificial intelligence. ChatGPT (OpenAI) was used to structure data, translate the manuscript from Uzbek into Russian, and prepare English-language metadata. The scientific findings and final content have been verified by the authors.

1. Введение

Хотя рафинирование растительных масел направлено на улучшение технологических показателей качества, каждая стадия очистки сопряжена с определённым компромиссом между выходом нейтрального масла и сохранением биологически значимых липидных компонентов. При щелочной нейтрализации свободные жирные кислоты переходят в мыльную фазу, вместе с которой возможно удаление части нейтрального масла [1, 3]. Адсорбционная отбелка снижает содержание пигментов и полярных примесей, однако требует учёта отработанного адсорбента, фильтрационного осадка и удерживаемого ими масла [2].

Технологическая специфика льняного масла определяется высокой долей α-линоленовой кислоты (C18:3 n-3) и чувствительностью его состава к окислению. Увеличение глубины очистки не всегда обеспечивает одновременное улучшение всех характеристик конечного продукта. Jing и соавт. [4] сопоставили качество и окислительную стабильность льняных масел разной степени рафинирования; Kong и соавт. [5] исследовали влияние стадий, предшествующих дезодорации, на образование транс-жирных кислот. Тепловая нагрузка при дезодорации связана с изменением липидного состава и маркеров окисления [6, 7].

В предшествующих исследованиях отдельно рассмотрены способы извлечения масла [10], профиль летучих веществ [8], а также токоферолы и окислительная стабильность [9]. Вместе с тем сопоставление выхода продукта, доли α-линоленовой кислоты, токоферолов, выбранных транс-изомеров и летучих соединений в рамках взаимосвязанных последовательных стадий предоставляет дополнительную информацию для принятия технологических решений. Научная новизна работы заключается в первом комплексном представлении ранее не опубликованных экспериментальных результатов, их интеграции на основе единых межстадийных расчётных критериев и разработке новой интерпретации соотношения качества и выхода продукта.

Цель исследования – сопоставить выход продукта и изменения липидных компонентов при последовательном рафинировании прессового и экстракционного льняного масла, количественно охарактеризовать основные разнонаправленные тенденции и предложить контрольные точки технологического процесса.

2. Материалы и методы

Объектом анализа служили экспериментальные результаты исследования нерафинированного льняного масла, полученного холодным прессованием (ХП), горячим прессованием (ГП) и экстракцией (Э). Сопоставимые измерения по полной последовательности нейтрализация-отбелка-дезодорация имеются для масел ГП и Э; образец ХП использован только для сравнения исходного качества.

В первой серии опытов по нейтрализации исследовали растворы NaOH с концентрацией 100, 110, 120 и 130 г/л при избытке щёлочи 60 %. Во второй серии при фиксированной концентрации 110 г/л для масла ГП и 120 г/л для масла Э избыток щёлочи относительно теоретически необходимого количества изменяли в пределах 20, 40, 60, 80 и 100 %. При отбелке применяли адсорбент, обозначенный в экспериментальных материалах как Super FF, в количестве 0,5; 1,0; 1,5 и 2,0 % от массы масла.

Жирнокислотный состав выражали в относительных процентах по результатам газовой хроматографии метиловых эфиров жирных кислот с пламенно-ионизационным детектированием (ГХ-ПИД). Содержание α-, β-, γ- и δ-токоферолов обобщали по данным высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) в мг/кг. Для летучих веществ рассчитывали сумму 11 выбранных соединений, приведённых в имеющейся экспериментальной таблице.

Перечень 11 летучих веществ ограничен соединениями, для которых в исходной экспериментальной сводке сохранены сопоставимые количественные значения на всех стадиях. Критерии первоначального включения конкретных веществ в этот перечень документально не подтверждены; поэтому сумма рассматривается как показатель выбранного набора, а не всех летучих органических веществ. Полные протоколы температуры, разрежения и продолжительности дезодорации, данные о повторностях, содержании остаточного масла в мыльной фазе и отработанном адсорбенте, а также значения р-анизидинового числа для сопоставимой серии не представлены в анализируемой сводке. Эти показатели не восполнялись расчётными предположениями.

При обработке данных межстадийную разность рассчитывали по формуле ΔX = X(после) - X(до). Для жирных кислот и транс-изомеров разность выражали в процентных пунктах, для токоферолов и летучих веществ – в мг/кг. Относительное сохранение концентрации рассчитывали как R = 100 × C(конечная)/C(исходная). Показатель R характеризует отношение концентраций, а не фактическое сохранение массы вещества по материальному балансу.

Статистическую обработку выполняли как описательный анализ уже полученных значений по фиксированным уровням технологических факторов. Для двух серий нейтрализации (по 5 уровней избытка NaOH) и двух серий отбелки (по 4 уровня дозировки Super FF) рассчитывали линейную аппроксимацию y = a + bx методом наименьших квадратов и коэффициент детерминации $R^2 = 1 - \Sigma(y_i - \hat{y}_i)^2/\Sigma(y_i - \bar{y})^2$. Наклон b переводили в изменение показателя на шаг фактора: 20 процентных пунктов избытка NaOH либо 0,5 процентного пункта адсорбента. Значения R^2 характеризуют только согласованность наблюдаемых точек с прямой, а не точность метода или воспроизводимость эксперимента. Число уровней фактора не является числом независимых повторов. Поскольку протоколы повторных измерений и исходные значения по повторам отсутствуют, стандартные отклонения, доверительные интервалы, p-значения и проверку статистической значимости не рассчитывали.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Различия в составе исходных образцов

Таблица 1. Исходные показатели нерафинированного льняного масла, полученного различными способами

Показатель	Холодное прессование	Горячее прессование	Экстракция
α-линоленовая кислота, %	52,02	51,49	50,26
Суммарные токоферолы, мг/кг	387,90	304,00	326,60
γ-токоферол, мг/кг	364,80	284,90	305,30
Сумма 11 выбранных летучих соединений, мг/кг	11,53	23,53	14,25
Сумма двух C18 транс-изомеров, %	0,00*	0,06	0,13
Отношение полиненасыщенных к насыщенным жирным кислотам (ПНЖК/НЖК), безразмерное	6,91	6,71	6,23

Примечание. Сумма транс-изомеров включает только C18:1(9t) и C18:2(9t,12t). Значение 0,00 может соответствовать содержанию ниже предела обнаружения и не должно трактоваться как абсолютное отсутствие.

В исходных образцах относительная доля α-линоленовой кислоты находилась в диапазоне 50,26 – 52,02 %. Наибольшая концентрация суммарных токоферолов зарегистрирована в масле ХП – 387,90 мг/кг; для ГП и Э она составила соответственно 304,00 и 326,60 мг/кг. Эти показатели характеризуют различия состава между группами образцов; для установления причинного влияния исключительно способа извлечения масла необходимы полные протоколы с использованием одинаковых партий семян и повторных опытов.

Различие исходной доли α-линоленовой кислоты между ХП и Э составило 1,76 процентного пункта, между ХП и ГП – 0,53 процентного пункта. При этом различия в содержании токоферолов не повторяли указанную последовательность: в образце Э доля α-линоленовой кислоты была ниже, чем в ГП, тогда как концентрация суммарных токоферолов – выше. Следовательно, эти два показателя не могут служить простыми взаимозаменяемыми характеристиками.

Zeng и соавт. [10] сравнили извлечение льняного масла растворителем, холодное и горячее прессование, а также водно-ферментативную экстракцию и показали необходимость оценки качества не только по жирнокислотному составу, но и по сопутствующим липофильным компонентам. Sun и соавт. [8] с применением HS-GC-IMS идентифицировали 81 летучее соединение и установили различия ароматического профиля в зависимости от способа извлечения. Сумма 11 выбранных летучих веществ в нашей работе не эквивалентна количественно профилю из 81 компонента; сравнение допустимо лишь на уровне общих тенденций и методических подходов.

Неоднородность состава исходных масел обосновывает необходимость раздельной оценки эффективности последующих стадий для каждого типа масла. Для разграничения влияния исходного состава, технологического режима и происхождения образцов на конечные различия масел ГП и Э требуются парные опыты с одинаковыми партиями сырья.

3.2. Нейтрализация: баланс кислотного числа и выхода продукта

Таблица 2. Влияние избытка NaOH на выход масла и показатели качества

Масло	Избыток NaOH, %	Кислотное число, мг KOH/г	Цветное число, мг I_2	Выход масла, %
ГП	20	0,62	37	98,77
ГП	40	0,29	27	98,21
ГП	60	0,22	20	97,84
ГП	80	0,18	12	97,45
ГП	100	0,12	9	96,97
Э	20	1,39	50	97,92
Э	40	1,11	47	96,54
Э	60	0,63	43	95,59
Э	80	0,33	33	95,44
Э	100	0,23	27	94,93

Примечание. Концентрация NaOH для масла ГП составляла 110 г/л, для масла Э – 120 г/л. Таблица отражает серию с изменением избытка щёлочи; её не следует смешивать с отдельной серией изменения концентрации NaOH.

При увеличении избытка щёлочи с 20 до 100 % кислотное число масла ГП снизилось с 0,62 до 0,12 мг KOH/г, а выход продукта – с 98,77 до 96,97 % (-1,80 процентного пункта). Для масла Э кислотное число уменьшилось с 1,39 до 0,23 мг KOH/г, а выход – с 97,92 до 94,93 % (-2,99 процентного пункта). Таким образом, более интенсивная нейтрализация сопровождалась снижением выхода продукта при уменьшении кислотности.

В отдельной серии изменения концентрации NaOH при 120 г/л для масла ГП кислотное число составило 0,18 мг KOH/г при выходе 97,60 %, а при 130 г/л – соответственно 0,20 мг KOH/г и 97,44 %. Для масла Э при 120 г/л зарегистрированы кислотное число 0,63 мг KOH/г и выход 95,59 %. Эти наблюдения показывают, что максимальную концентрацию реагента нельзя автоматически считать оптимальной.

Одинаковое увеличение избытка щёлочи на 20 процентных пунктов на разных участках диапазона давало неодинаковые результаты. Для масла ГП при переходе 20 → 40 % кислотное число уменьшилось на 0,33 мг KOH/г при снижении выхода на 0,56 процентного пункта; при переходе 80 → 100 % дополнительное уменьшение кислотного числа составило лишь 0,06 мг KOH/г, а выхода – 0,48 процентного пункта. Следовательно, в верхней части исследованного диапазона соотношение дополнительного снижения кислотности и потери выхода отличается от других интервалов.

Для масла Э данная закономерность не воспроизводилась полностью: при переходе 60 → 80 % кислотное число снизилось с 0,63 до 0,33 мг KOH/г, тогда как выход уменьшился лишь с 95,59 до 95,44 % (на 0,15 процентного пункта). При переходе 80 → 100 % кислотное число дополнительно уменьшилось на 0,10 мг KOH/г, а выход – на 0,51 процентного пункта. Различный отклик масел ГП и Э показывает некорректность механического переноса режимов между типами масла или сырья. Статистическая значимость указанных численных различий не проверялась.

Chumsantea и соавт. [1] на модельных системах из пальмового, соевого и подсолнечного масел показали, что при нейтрализации мыльная эмульсия может захватывать нейтральное масло, а некоторые деэмульгаторы способны уменьшать эти потери. В наших опытах увеличение дозы NaOH также сопровождалось снижением выхода, однако содержание нейтрального масла в мыльной фазе не определялось. Поэтому эмульгирование следует рассматривать как возможный согласующийся с наблюдениями механизм, а не как единственную доказанную причину.

Gharby [3] обобщил существование компромисса между удалением свободных жирных кислот, потерями масла и сохранением сопутствующих компонентов при химическом рафинировании. В нашей серии нейтрализации этот компромисс выражен количественно. Однако для выбора наилучшего режима необходимы нормативные пределы кислотного числа и цветности готового продукта, сведения о расходе воды и щёлочи, а также экономические показатели. Поскольку такие ограничения не заданы, единый универсальный оптимальный режим по результатам серии не объявляется.

Таким образом, для оценки нейтрализации выделяются три самостоятельных критерия: (i) снижение кислотного числа до требуемого уровня; (ii) выход продукта относительно исходного масла; (iii) стабильность состава на последующих стадиях отбелки и дезодорации. Максимизация или минимизация лишь одного из этих критериев технологически недостаточна.

3.3. Расход адсорбента и результаты отбелки

Таблица 3. Влияние дозировки адсорбента Super FF на качество отбеленного масла

Масло	Адсорбент, %	Цветное число, мг I_2	Кислотное число, мг KOH/г	Перекисное число, ммоль активного O/кг
ГП	0,5	22	0,28	2,94
ГП	1,0	17	0,27	2,92
ГП	1,5	12	0,27	2,87
ГП	2,0	9	0,26	2,84
Э	0,5	28	0,32	4,44
Э	1,0	23	0,31	4,35
Э	1,5	18	0,29	4,33
Э	2,0	13	0,28	4,26

При увеличении дозы адсорбента с 0,5 до 2,0 % цветное число масла ГП снизилось с 22 до 9 мг I_2, а масла Э – с 28 до 13 мг I_2. Относительное снижение составило соответственно 59,1 и 53,6 %. Для обоснованного определения экономически или экологически оптимальной дозировки на основании улучшения цветности необходимо дополнительно установить выход масла после фильтрации и массу остаточного масла в отработанном адсорбенте.

Важно также сравнить зависимость «доза-эффект» на отдельных интервалах. При увеличении дозы адсорбента для масла ГП с 0,5 до 1,0 % цветное число снизилось с 22 до 17 мг I_2, а при увеличении с 1,5 до 2,0 % – с 12 до 9 мг I_2. Следовательно, одинаковое повышение дозировки на 0,5 процентного пункта сопровождалось уменьшением дополнительного эффекта по цветности с 5 до 3 мг I_2. Для масла Э каждое увеличение дозы на 0,5 процентного пункта снижало цветное число на 5 мг I_2. Поэтому для ГП наблюдается тенденция, напоминающая убывающую предельную эффективность, а для Э – более близкий к линейному отклик в изученном диапазоне; речь идёт лишь об описании четырёх экспериментальных точек.

При варьировании дозы адсорбента перекисное число масла ГП уменьшилось с 2,94 до 2,84, а масла Э – с 4,44 до 4,26 ммоль активного кислорода/кг. Без статистических испытаний столь небольшие различия нельзя трактовать как достоверно установленный технологический эффект. Кроме того, уменьшение перекисного числа само по себе не доказывает снижения содержания продуктов вторичного окисления; на следующей стадии целесообразен совместный контроль p-анизидинового числа и других маркеров окисления.

Dijkstra [2] рассмотрел способы утилизации и переработки отработанной отбельной земли. Эта публикация не подтверждает рассчитанные нами проценты снижения цветного числа, а служит внешним научным обоснованием необходимости совместного учёта расхода свежего адсорбента, остаточного масла и вторичных отходов. Технологическая оценка отбелки должна одновременно включать цветность, показатели первичного и вторичного окисления, расход адсорбента и выход фильтрата. Для расчёта полной ресурсоэффективности в нашем исследовании необходим дополнительный материальный баланс.

3.4. Межстадийная динамика липидных и летучих компонентов

Таблица 4. Основные показатели состава на последовательных стадиях рафинирования

Масло и показатель	Исходное	Нейтрализация	Отбелка	Дезодорация
ГП: α-линоленовая кислота, %	51,49	50,96	50,16	46,50
Э: α-линоленовая кислота, %	50,26	49,51	48,48	45,24
ГП: токоферолы, мг/кг	304,00	260,53	186,36	120,81
Э: токоферолы, мг/кг	326,60	272,66	180,73	113,98
ГП: сумма двух транс-изомеров, %	0,06	0,15	0,21	0,66
Э: сумма двух транс-изомеров, %	0,13	0,21	0,29	0,86
ГП: 11 летучих соединений, мг/кг	23,53	24,26	47,62	16,36
Э: 11 летучих соединений, мг/кг	14,25	15,58	47,46	17,47

Примечание. Доля α-линоленовой кислоты и транс-изомеров представлена как относительная хроматографическая доля. Сумма двух транс-изомеров не эквивалентна общему содержанию транс-жирных кислот. Изменение концентрации токоферолов не характеризует полную потерю их массы.

В полной последовательности рафинирования доля α-линоленовой кислоты в масле ГП снизилась с 51,49 до 46,50 % (-4,99 процентного пункта), а в масле Э – с 50,26 до 45,24 % (-5,02 процентного пункта). Наиболее заметное снижение относительной доли наблюдалось на стадии дезодорации. Однако изменение процентного состава не тождественно уменьшению абсолютной массы α-линоленовой кислоты.

При раздельном рассмотрении стадий относительная доля α-линоленовой кислоты в масле ГП уменьшилась на 0,53 процентного пункта при нейтрализации, на 0,80 – при отбелке и на 3,66 – при дезодорации. Для масла Э соответствующие снижения составили 0,75; 1,03 и 3,24 процентного пункта. В обоих образцах наибольший абсолютный межстадийный сдвиг пришёлся на дезодорацию. Этот результат относится именно к фракционному составу и не характеризует абсолютное молярное количество кислоты или массу потерь вследствие окисления.

Jing и соавт. [4] сравнили льняные масла различной степени очистки и показали, что глубокое рафинирование изменяет долю α-линоленовой кислоты, содержание биоактивных веществ и профиль соединений, связанных с окислением. Постадийное снижение в нашем исследовании соответствует общей направленности этих наблюдений. Вместе с тем прямое количественное сопоставление процентов из разных исследований некорректно без подтверждения идентичности расчётной базы, хроматографического количественного определения и технологических режимов.

Liu и соавт. [6] в промышленных испытаниях четырёх других растительных масел, а не льняного, показали возможность ограничения термического повреждения и образования транс-жирных кислот при более мягких режимах дезодорации. Sun и соавт. [7] установили влияние температуры и продолжительности дезодорации соевого масла на свободные радикалы и показатели окисления. Обе работы формируют методическую основу для

дальнейшего исследования стадии дезодорации в нашей системе, но не устанавливают оптимальные температуру и продолжительность обработки именно исследованного льняного масла.

Концентрация суммарных токоферолов последовательно изменялась от 304,00 через 260,53 и 186,36 до 120,81 мг/кг в масле ГП и от 326,60 через 272,66 и 180,73 до 113,98 мг/кг в масле Э. Отношение конечной концентрации к исходной составило 39,7 % для ГП и 34,9 % для Э. Полученные данные указывают на необходимость отдельного контроля токоферольного профиля в ходе рафинирования.

Межстадийное изменение концентрации токоферолов в масле ГП составило -43,47 мг/кг при нейтрализации, -74,17 мг/кг при отбелке и -65,55 мг/кг при дезодорации. Для масла Э соответствующие значения равнялись -53,94; -91,93 и -66,75 мг/кг. Таким образом, в обоих образцах наибольшее снижение концентрации этого показателя зарегистрировано после отбелки. Данную последовательность нельзя трактовать как прямую причинную зависимость от дозировок, использованных в отдельных сериях нейтрализации или отбелки.

Значения 39,7 и 34,9 % для токоферолов рассчитаны как отношение концентраций в мг/кг. При изменении общей массы масла на стадиях рафинирования фактическое отношение масс токоферолов в исходном и конечном продуктах может отличаться от указанных величин. Поэтому эти значения не следует называть «процентом сохранения массы токоферолов».

Vera-Candioti и соавт. [9] оценивали роль γ-токоферола, фенольных соединений и фитостеролов в окислительной стабильности льняного масла, в том числе их взаимодействие при определённых условиях. Преобладание γ-токоферола в наших исходных образцах тематически согласуется с указанной публикацией. Однако только на основании снижения концентрации токоферолов нельзя заключить, что окислительная стабильность уменьшилась пропорционально: для этого необходимы дополнительные данные о периоде индукции, профиле фенолов и фитостеролов, а также маркерах окисления.

Сумма двух определённых транс-изомеров изменялась в масле ГП по ряду 0,06 → 0,15 → 0,21 → 0,66 %, а в масле Э – 0,13 → 0,21 → 0,29 → 0,86 %. Особенно заметное увеличение доли наблюдалось после дезодорации. Однако показатель охватывает только измеренные изомеры C18:1(9t) и C18:2(9t,12t), поэтому его нельзя приравнивать к общему содержанию транс-жирных кислот.

Непосредственно перед дезодорацией сумма двух изомеров составляла 0,21 % в масле ГП и 0,29 % в масле Э, а после дезодорации достигла соответственно 0,66 и 0,86 %. Дополнительное увеличение на заключительной стадии составило 0,45 и 0,57 процентного пункта, или 75,0 и 78,1 % общего прироста за всю последовательность. Эти доли характеризуют только расчётное распределение наблюдаемого изменения и не являются прямыми измерениями кинетики процесса или механизма изомеризации.

Kong и соавт. [5] установили, что степень нейтрализации и отбелки льняного масла перед дезодорацией влияет на последующее образование транс-жирных кислот. Авторы специально исследовали факторы, связанные с пигментами и свободными жирными кислотами. В наших данных также отмечен рост показателя на стадии дезодорации, но для подтверждения такого механизма необходимы дополнительные контролируемые опыты с определением содержания пигментов и свободных жирных кислот. Поэтому ссылка [5] относится к внешнему научному сопоставлению, а не к нашим табличным результатам.

Liu и соавт. [6] показали возможность регулирования содержания транс-жирных кислот с помощью более мягких режимов дезодорации других масел. Эти опыты не доказывают применимость тех же настроек к льняному маслу. Контроль двух изомеров в нашем исследовании не заменяет полного мониторинга транс-жирных кислот и не может использоваться как единственное доказательство соответствия продукта нормативам безопасности.

Сумма 11 выбранных летучих соединений после отбелки увеличилась до 47,62 мг/кг в масле ГП и 47,46 мг/кг в масле Э, а после дезодорации снизилась до 16,36 и 17,47 мг/кг соответственно. Конечное значение для масла Э осталось выше исходного уровня 14,25 мг/кг. Следовательно, обобщённое утверждение о том, что дезодорация снизила содержание всех летучих веществ ниже исходного уровня, было бы неверным.

При переходе от отбелки к дезодорации сумма 11 выбранных летучих соединений уменьшилась в масле ГП с 47,62 до 16,36 мг/кг, а в масле Э – с 47,46 до 17,47 мг/кг. Относительное снижение составило соответственно 65,6 и 63,2 %. По сравнению с исходным образцом конечная сумма оказалась ниже на 30,5 % для масла ГП, но выше на 22,6 % для масла Э. Таким образом, несмотря на уменьшение содержания летучих соединений на заключительной стадии, итоговые результаты относительно исходного состояния различались. Эти данные относятся только к 11 измеренным веществам и не характеризуют полный спектр летучих органических компонентов, интенсивность запаха, вкусовые свойства или все потенциально опасные карбонильные соединения. Sun и соавт. [8] показали зависимость профиля 81 летучего соединения льняного масла от способа экстракции с применением HS-GC-IMS. Наша серия из 11 соединений основана на другом наборе аналитических показателей, поэтому прямое количественное или стандартизованное сенсорное сопоставление не проводилось. Jing и соавт. [4] также отмечали неодинаковую динамику отдельных альдегидов и других летучих продуктов, связанных с окислением, по мере углубления рафинирования. Временное увеличение суммы после отбелки согласуется с представлением о сложной динамике этих компонентов, однако имеющиеся данные не позволяют разграничить возможный вклад окисления, миграции из адсорбента и перераспределения соединений.

3.5. Производные показатели и их интерпретация

Таблица 5. Дополнительные показатели, рассчитанные по межстадийным изменениям

Показатель	Горячее прессование	Экстракция
Конечная/исходная концентрация токоферолов, %	39,7	34,9
Доля последней стадии в общем снижении α-линоленовой кислоты, %	73,3	64,5
Доля последней стадии в общем приросте двух транс-изомеров, %	75,0	78,1
Изменение 11 летучих соединений при дезодорации относительно отбелки, %	-65,6	-63,2
Отношение конечной суммы 11 летучих соединений к исходной, безразмерное	0,70	1,23

Расчётные показатели характеризуют стадии, на которых сосредоточена наибольшая часть наблюдаемых изменений. На заключительную стадию пришлось 73,3 % общего снижения доли α-линоленовой кислоты в масле ГП и 64,5 % – в масле Э. На дезодорацию также пришлось соответственно 75,0 и 78,1 % общего увеличения суммы двух выбранных транс-изомеров. Эти арифметические отношения нельзя интерпретировать как доли кинетического вклада реакций или степени причинного воздействия.

При расчёте межстадийных долей необходимо сохранять физический смысл знаменателя. Для α-линоленовой кислоты значения 73,3 и 64,5 % показывают, какая часть суммарного снижения, выраженного в процентных пунктах за три стадии, наблюдалась на заключительной стадии. Для транс-изомеров значения 75,0 и 78,1 % характеризуют долю заключительной стадии в общем увеличении. Объединять оба показателя в единый «процент потерь» научно некорректно.

Выход масла количественно определён только в серии нейтрализации. Поскольку полный баланс продукта при отбелке и дезодорации не исследовался, фактическая масса готового дезодорированного масла из 1 кг сырого масла не рассчитывалась. Аналогично показатель сохранения концентрации токоферолов в мг/кг нельзя подменять абсолютной массой в миллиграммах или граммах в расчёте на исходное сырьё.

В разных экспериментальных сериях варьировали разные технологические факторы: в таблице 2 – избыток NaOH, в таблице 3 – дозу адсорбента, а в таблице 4 прослеживали межстадийный состав. Поэтому произвольное объединение конкретного варианта NaOH из таблицы 2 с определённой дозой адсорбента из таблицы 3 и объявление полученной комбинации доказанным оптимумом всей технологической цепочки недопустимо.

3.6. Схема многокритериального технологического контроля

Таблица 6. Рекомендуемые контрольные показатели на различных стадиях рафинирования

Контрольная точка	Измеряемые показатели	Технологическое решение
Сырое масло	ГХ-ПИД (жирные кислоты); ВЭЖХ (токоферолы); выбранные летучие вещества; кислотное и перекисное числа	Определение исходного состава и показателей качества
После нейтрализации	Кислотное число; цветное число; выход масла; дозировка NaOH	Баланс кислотности и выхода; учёт мыльной фазы
После отбелки	Цветное и перекисное числа; токоферолы; летучие вещества; дозировка адсорбента	Улучшение цветности не доказывает стабильности; необходим контроль выхода фильтрата
После дезодорации	ГХ-ПИД (α-линоленовая кислота, выбранные транс-изомеры); ВЭЖХ; летучие вещества; р-анизидиновое число	Отдельная проверка изменений состава, безопасности и срока хранения

Предложенная схема многокритериального контроля основана на принципе, согласно которому улучшение одного показателя не устраняет автоматически неблагоприятного изменения другого. Так, снижение цветного числа не означает сохранения концентрации токоферолов или отсутствия увеличения доли выбранных транс-изомеров. Совокупность

показателей таблицы 6 представляет собой разработанную на основе экспериментальных данных схему наблюдения и принятия решений, а не утверждённый промышленный регламент.

Первое условие практического принятия решений – установление целевых нормативных пределов кислотного числа, цветности, перекисного числа и требуемого липидного профиля для конкретного вида продукции. Второе – сравнение выхода и расходных показателей среди вариантов, соответствующих установленным пределам. Третье – отдельный контроль изменений α-линоленовой кислоты, токоферолов и выбранных транс-изомеров при заключительной высокотемпературной обработке. Имеющиеся данные обосновывают логику этих правил, но сами нормативные пределы в работе не установлены.

Для последующей многокритериальной оптимизации необходимо одновременно с выходом при нейтрализации учитывать остаточное масло в мыльной фазе, выход фильтрата после отбелки, массу фильтрационного осадка, дистиллят дезодорации, расход воды и энергии, а также фактические температурно-вакуумные и временные режимы. Это позволит объединить показатели качества с материальным и энергетическим балансами в рамках одной экспериментальной базы.

3.7. Описательная аппроксимация дозовых рядов и пределы статистических выводов

Для количественного описания направленности изменений использовали имеющиеся пять уровней избытка NaOH (табл. 2) и четыре уровня дозы адсорбента (табл. 3). Рассчитанные методом наименьших квадратов наклоны и коэффициенты R^2 приведены в таблице 7. При этом каждая точка соответствует одному указанному уровню фактора в имеющейся сводке; она не рассматривается как независимая биологическая или технологическая повторность.

Таблица 7. Параметры описательной линейной аппроксимации по уровням технологических факторов

Фактор	Показатель	Уровней	Изменение на шаг	R^2
Избыток NaOH	Выход масла ГП, %	5	−0,436	0,995
Избыток NaOH	Выход масла Э, %	5	−0,708	0,900
Избыток NaOH	Кислотное число ГП, мг KOH/г	5	−0,111	0,796
Избыток NaOH	Кислотное число Э, мг KOH/г	5	−0,310	0,961
Доза Super FF	Цветное число ГП, мг I_2	4	−4,400	0,988
Доза Super FF	Цветное число Э, мг I_2	4	−5,000	1,000
Доза Super FF	Перекисное число ГП, ммоль O/кг	4	−0,035	0,976
Доза Super FF	Перекисное число Э, ммоль O/кг	4	−0,056	0,950

Примечание. Шаг фактора для избытка NaOH равен 20 процентным пунктам, для дозы адсорбента – 0,5 процентного пункта. Указано изменение зависимого показателя на один такой шаг по наклону прямой, а не наблюдаемая разность конкретных соседних опытов. В таблице отражены 5 и 4 уровня фактора, а не 5 и 4 повторения. R^2 рассчитан по точкам каждого дозового ряда; доверительные интервалы и p-значения неприменимы без исходных повторных наблюдений.

При повышении избытка NaOH на 20 процентных пунктов аппроксимированное изменение выхода составило -0,436 процентного пункта для масла ГП (R^2 = 0,995) и -0,708 процентного пункта для масла Э (R^2 = 0,900). Рост дозировки Super FF на 0,5 процентного пункта соответствовал аппроксимированному снижению цветного числа на 4,4 мг I_2 для ГП (R^2 = 0,988) и 5,0 мг I_2 для Э (R^2 = 1,000). Эти показатели дают количественную характеристику тенденций в пределах исследованных диапазонов, но не служат доказательством линейной кинетики или причинного эффекта и не заменяют полноценную оценку разброса результатов при повторных опытах.

Многообразие исследованных физико-химических показателей способствует согласованной технологической интерпретации результатов. Однако само по себе количество показателей не повышает доказательность: без сведений о повторностях, источниках неопределённости и валидации методов небольшие различия нельзя трактовать как достоверное преимущество.

Научная новизна исследования состоит в рассмотрении результатов в рамках единой научной задачи – совместной постадийной оценки качества, выхода и состава масла. Предложенный подход не сводится к повторному изложению отдельных чисел: он выявляет значимый для технологического выбора баланс между снижением выхода при нейтрализации, улучшением цветности при отбелке и изменениями состава при дезодорации. Научные обобщения требуют последующей проверки в независимых повторных опытах с полным материальным балансом.

4. Заключение

1. Исходные образцы льняного масла различались по доле α-линоленовой кислоты, концентрации токоферолов и сумме выбранных летучих соединений. Масло холодного прессования использовалось только для сравнения исходного состава.

2. Увеличение избытка NaOH с 20 до 100 % снижало кислотное число масел ГП и Э, но сопровождалось уменьшением выхода соответственно на 1,80 и 2,99 процентного пункта. Выбирать режим только по минимальному кислотному числу недостаточно.

3. В ходе полного рафинирования относительная доля α-линоленовой кислоты в маслах ГП и Э снизилась на 4,99 и 5,02 процентного пункта. Конечная концентрация токоферолов составила соответственно 39,7 и 34,9 % исходного значения. Доля двух определённых транс-изомеров особенно заметно увеличилась на заключительной стадии.

4. Отбелка снижала цветное число, однако для подтверждения экономически или экологически оптимальной дозы рекомендуется совместный постадийный контроль выхода продукта, состава и маркеров окисления.

Список литературы

1. Chumsantea S., Aryusuk K., Lilitchan S., Jeyashoke N., Krisnangkura K. Reducing Oil Losses in Alkali Refining // Journal of the American Oil Chemists’ Society. – 1919. – T. 89, № 10. – P. 1913–1919. – DOI: 10.1007/s11746-012-2079-x.
2. Dijkstra A.J. What to Do with Spent Bleaching Earth? A Review // Journal of the American Oil Chemists’ Society. – 2020. – T. 97, № 6. – P. 565–575. – DOI: 10.1002/aocs.12358.

3. Gharby S. Refining Vegetable Oils: Chemical and Physical Refining // The Scientific World Journal. – 2022. – T. 2022. – Art. 6627013. – DOI: 10.1155/2022/6627013.
4. Jing Y., Song Z., Li H., Wei X., Xie J., Shen M. The quality and oxidative stability of flaxseed oils of varying degrees of refinement // Grain & Oil Science and Technology. – 2025. – T. 8, № 3. – P. 163–174. – DOI: 10.1016/j.gaost.2025.05.002.
5. Kong M., Du Y., Chen X., Cai R., Xie J., Shen M. Investigation into the effects of the refining steps before deodorization on the formation of trans fatty acids in linseed oils // Journal of Food Composition and Analysis. – 2024. – T. 134. – Art. 106549. – DOI: 10.1016/j.jfca.2024.106549.
6. Liu X., Zhou S., Jiang Y., Xu X. Optimization of Deodorization Design for Four Different Kinds of Vegetable Oil in Industrial Trial to Reduce Thermal Deterioration of Product // Journal of the American Oil Chemists' Society. – 2021. – T. 98, № 4. – P. 475–483. – DOI: 10.1002/aocs.12453.
7. Sun L., Huang Z., Wang J., Yu D., Wang L. Effect of deodorization conditions on fatty acid profile, oxidation products, and lipid-derived free radicals of soybean oil // Food Chemistry. – 2024. – T. 453. – Art. 139656. – DOI: 10.1016/j.foodchem.2024.139656.
8. Sun X., Wan Y., Liu W., Wei C. Effects of different extraction methods on volatile profiles of flaxseed oils // Journal of Food Science. – 2023. – T. 88, № 12. – P. 4988–5001. – DOI: 10.1111/1750–3841.16787.
9. Vera-Candioti L., Negro E., Mancini S.I., Bernal C.A. Oxidative stability of flaxseed oil: effects of tocopherols, phytosterols and extraction conditions // Food Chemistry. – 2026. – T. 502. – Art. 147708. – DOI: 10.1016/j.foodchem.2025.147708.
10. Zeng J., Xiao T., Ni X., Wei T., Liu X., Deng Z.-Y., Li J. The comparative analysis of different oil extraction methods based on the quality of flaxseed oil // Journal of Food Composition and Analysis. – 2022. – T. 107. – Art. 104373. – DOI: 10.1016/j.jfca.2021.104373.

Статья поступила в редакцию: 07.10.2026
Статья принята к публикации: 23.10.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 638.2+66.047+519.6

Морка и сушка коконов тутового шелкопряда с помощью вакуумной установки: теоретические основы, математическое моделирование и технологический эффект

Сафаров Жасур Эсиргапович
д-р техн. наук, проф.
Ташкентский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: jasursafarov@yahoo.com

Эргашев Жамшид Жуманазарович
преподаватель
Национальный педагогический университет Узбекистана имени Низами
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Moring and drying of mulberry silkworm cocoons using a vacuum system: theoretical foundations, mathematical modeling, and technological effect

Safarov Jasur Esirgapovich
doctor of Technical Sciences, Professor
Tashkent State Technical University
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Ergashev Jamshid Jumanazarovich
teacher
National Pedagogical University of Uzbekistan named after Nizami
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

Данная научно-исследовательская работа посвящена решению фундаментальной научно-технической проблемы шелкоперерабатывающей отрасли — интенсификации процессов первичной обработки коконного сырья тутового шелкопряда (*Bombyx mori*) при сохранении его природных физико-механических свойств. Традиционные конвективные и паровые методы замаривания и сушки приводят к необратимой термической и гидротермической деструкции белкового комплекса шелковой оболочки, в частности, легкорастворимых фракций серицина. Это вызывает повышенную обрывность нити при кокономотании и снижает выход высших сортов шелка-сырца. В качестве высокоэффективной альтернативы теоретически обоснована и экспериментально реализована технология совмещенной морки и сушки живых коконов в вакуумной установке

Библиографическое описание: Сафаров Ж.Э., Эргашев Ж.Ж. Морка и сушка коконов тутового шелкопряда с помощью вакуумной установки: теоретические основы, математическое моделирование и технологический эффект // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23613

с комбинированным энергоподводом (кондуктивным и радиационным ИК-нагревом). В статье подробно описана кинетика удаления влаги, представлена математическая модель нестационарного тепломассопереноса в капиллярно-пористой структуре кокона в условиях разрежения, а также приведены детальные результаты экспериментальных исследований при остаточном давлении 4–12 кПа. Установлено, что применение вакуумной технологии позволяет снизить удельные энергозатраты на 34,4 %, сократить цикл сушки в 4 раза, увеличить непрерывную длину разматываемой нити до 1040 м и повысить выход шелка-сырца на 4,5 %. На основе микроструктурного анализа доказано сохранение нативной конформации фиброина и серицина, что обеспечивает высокое качество конечной текстильной продукции.

Abstract

This research is devoted to addressing a fundamental scientific and engineering problem in the silk-processing industry—the intensification of the primary processing of mulberry silkworm (*Bombyx mori*) cocoon raw materials while preserving their natural physicomechanical properties. Conventional convective and steam-based stifling and drying methods result in irreversible thermal and hydrothermal degradation of the protein complex of the silk shell, particularly the readily soluble fractions of sericin. This leads to increased yarn breakage during silk reeling and reduces the yield of higher-grade raw silk. As a highly efficient alternative, a technology for the combined stifling and drying of live cocoons in a vacuum system with combined energy input (conductive and radiative infrared heating) was theoretically substantiated and experimentally implemented. The article provides a detailed description of the moisture-removal kinetics and presents a mathematical model of transient heat and mass transfer in the capillary-porous structure of the cocoon under reduced-pressure conditions. Detailed experimental results obtained at residual pressures of 4–12 kPa are also presented. It was established that the application of vacuum technology reduces specific energy consumption by 34.4 %, shortens the drying cycle by a factor of four, increases the continuous reeling length of the silk filament to 1,040 m, and improves the yield of raw silk by 4.5 %. Based on microstructural analysis, the preservation of the native conformation of fibroin and sericin was demonstrated, ensuring a high quality of the resulting textile products.

Ключевые слова: тутовый шелкопряд, коконы, вакуумная сушка, декомпрессионная морка, серицин, кинетика сушки, шелк-сырец.

Keywords: mulberry silkworm, cocoons, vacuum drying, decompression stifling, sericin, drying kinetics, raw silk.

Введение

Первичная обработка коконов тутового шелкопряда является критическим этапом в технологической цепочке получения натурального шелка. От эффективности проведения этой операции напрямую зависят текстильные, физико-механические и структурные характеристики шелка-сырца[2,7,10]. Живой кокон, собранный с коконников, представляет собой сложную биосистему, внутри которой находится живая куколка. Метаболические процессы внутри куколки продолжаются, и в течение 10–14 дней (в зависимости от температурно-влажностных условий окружающей среды) происходит её метаморфоз

в бабочку. Выходящая бабочка выделяет специфический щелочной фермент — коконазу, который частично гидролизует и растворяет белок серицин, скрепляющий шелковую нить. В результате бабочка раздвигает нити и проделывает отверстие в оболочке. Пробитые коконы теряют способность к непрерывной технологической размотке и переводятся в категорию низкосортных отходов (коконный сдир, бурелет), что наносит огромный экономический ущерб производству.

Чтобы предотвратить порчу сырья, коконы подвергают замариванию (морке) — принудительному прекращению жизнедеятельности куколки, с последующей сушкой до кондиционной остаточной влажности 10–12 %. В таком воздушно-сухом состоянии коконы (называемые кара-кокон) могут храниться на кокономотальных фабриках в течение нескольких лет без риска заплесневения или биологического разрушения.

Материалы и методы

В современной промышленной практике стран Центральной Азии и Азии доминируют два метода обработки

1. Паровой метод замаривания [1,6,10]. Коконы обрабатываются насыщенным паром при температуре 95–100 °C в специальных камерах в течение 10–15 минут. После этого мокрые коконы раскладываются на стеллажах для длительной теневой сушки, длящейся от 20 до 30 дней, либо направляются в шахтные сушилки. Главный недостаток — «запаривание» и гидротермическая деструкция серицина, который начинает плавиться и неравномерно перераспределяться по слоям оболочки, вызывая эффект склеивания соседних витков нити [2, 8, 10].

2. Конвективный горячевоздушный метод. Морка и сушка объединяются в один технологический цикл внутри многоярусных конвейерных сушилок (например, типа СКБ-45). Воздух, нагретый калориферами до температуры 110–115 °C, подается на верхние ярусы сушилки. Коконы движутся навстречу потоку тепла. Время полной сушки составляет 12–16 часов. Высокие температуры приводят к жесткой тепловой денатурации белков, снижению эластичности нити, увеличению хрупкости и росту обрывности при кокономотании. Удельный расход тепловой и электрической энергии при этом колоссален [3, 8, 10, 9].

Цель и задачи исследования

Целью настоящей работы является разработка, теоретическое обоснование и экспериментальная верификация инновационной энергосберегающей технологии совмещенной морки и сушки коконов тутового шелкопряда с использованием вакуумной установки, обеспечивающей сохранение нативного белкового комплекса шелковой нити и интенсификацию тепломассообменных процессов при пониженных температурах [1, 6, 4, 9].

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- Разработать конструктивную схему и создать экспериментальный стенд вакуумной установки.

- Исследовать механизм декомпрессионной морки куколок в условиях разрежения.

- Изучить кинетику удаления влаги из коконов при различных термобарических режимах.

- Разработать математическую модель нестационарного влагопереноса в вакууме.

- Провести сравнительный анализ качественных показателей шелка-сырца, полученного традиционным и вакуумным способами.

Структурно-физический анализ объекта исследования

Кокон тутового шелкопряда представляет собой анизотропную капиллярно-пористую оболочку эллипсовидной формы, внутри которой свободно располагается куколка. Оболочка сформирована непрерывной шелковой нитью, уложенной восьмиобразными петлями в 15–25 слоев. Длина нити в одном коконе колеблется от 600 до 1500 метров в зависимости от породы и условий выкормки [7,10].

Шелк-сырец является биполимером животного происхождения. Конструктивно нить состоит из двух параллельных фибриллярных нитей белка фиброина (70–75 % от общей массы), покрытых снаружи глобулярным белком серицином (20–25 %). Также в составе присутствуют воски, жиры, минеральные соли и пигменты (в сумме до 3–5 %). Фиброин придает нити механическую прочность, а серицин выполняет защитную и цементирующую функции [7,8]. Серицин гетерогенен и разделяется на четыре фракции (серицин A, B, C, D), обладающие различной растворимостью в воде. Наружные слои (серицин A и B) легко растворяются в теплой воде при температуре 50–60 °C, тогда как внутренние фракции, непосредственно примыкающие к фиброину, требуют для растворения жестких условий (температура выше 95 °C и щелочная среда).

Куколка, находящаяся внутри кокона, обладает высокой исходной влажностью — до 75–80 % от своей массы. Влажность самой оболочки существенно ниже — около 12–15 %. Таким образом, основная масса влаги (до 85–90 % от общего влагосодержания кокона) сосредоточена в теле куколки. При сушке эта влага должна испариться, диффундировать через внутреннее воздушное пространство кокона (коконную полость) и пройти сквозь многослойную пористую структуру оболочки наружу. Это накладывает серьезные ограничения на скорость процесса и требует точного регулирования температурных полей во избежание деформации оболочки [5,7].

Методология, материалы и экспериментальная установка

Экспериментальная часть работы выполнялась с использованием живых коконов тутового шелкопряда весенней выкормки гибридных комбинаций «Ипакчи 1» и «Ипакчи 2». Исходные характеристики исследуемых образцов:

Средняя масса живого кокона: 1,85–2,10 г.

Масса сырой оболочки: 0,38–0,45 г.

Шелковистость живых коконов: 20,5–21,8 %.

Исходное влагосодержание живой куколки: $W_{\text{н}}^{\text{к}} = 240 \ldots 260\%$ на сухое вещество.

Исходное суммарное влагосодержание кокона: $W_{\text{общ}} = 150 \ldots 165\%$

Лабораторная вакуум-термическая установка предназначена для совмещённого проведения процессов замаривания куколок и сушки коконов тутового шелкопряда при пониженном давлении. В состав установки входят герметичная вакуумная камера с рабочей ёмкостью для размещения коконов, система создания и поддержания разрежения, инфракрасные нагревательные элементы, система контроля температуры и давления, а также измерительные приборы для регистрации параметров технологического процесса [1,6,4].

В процессе работы коконы размещают внутри рабочей камеры, после чего создают заданное остаточное давление. Нагрев материала осуществляют с использованием инфракрасного излучения и теплопередачи от нагретых элементов установки. Температуру материала и давление в рабочей камере контролируют в течение всего цикла обработки. Удаляемая влага в виде водяного пара отводится из рабочей камеры посредством вакуумной системы. После завершения обработки давление в камере восстанавливают до атмосферного, а коконы извлекают для определения их остаточной влажности и оценки технологических показателей.

На рисунке 1 представлена зависимость влагосодержания коконов тутового шелкопряда от продолжительности процесса сушки при различных технологических режимах.

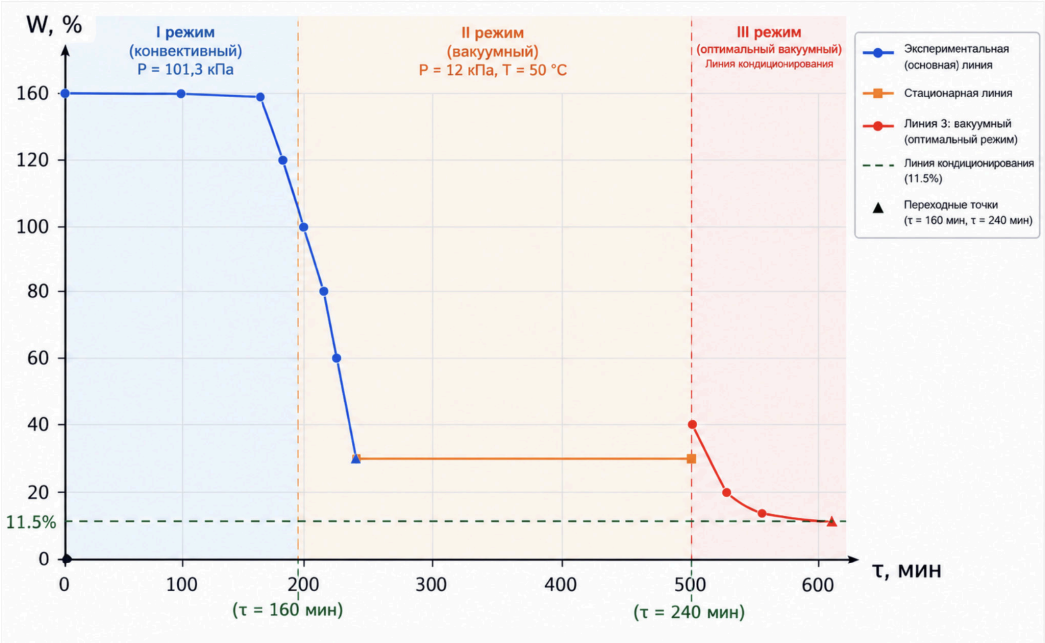


Рисунок 1. Зависимость влагосодержания коконов тутового шелкопряда W (%) от продолжительности процесса υ (мин) при различных технологических режимах

Из графика 1 отчетливо видно влияние остаточного давления на общую продолжительность процесса. При давлении P = 12 кПа температура кипения воды составляет около 50 °C, движущая сила процесса ниже, и время сушки затягивается до 230 минут [5, 4, 9]. При снижении давления до P = 6 кПа процесс интенсифицируется: удаление свободной влаги завершается за 150–160 минут, а общая продолжительность сушки до стандартной остаточной влажности 11 % составляет 180 минут. Дальнейшее снижение давления ниже 4 кПа признано экономически нецелесообразным, так как это требует применения дорогостоящих многоступенчатых вакуумных систем, но не дает существенного прироста скорости сушки из-за лимитирования процесса стадией подвода тепловой энергии через ИК-излучение.

Для математического описания экспериментальных кривых сушки использовано обобщенное уравнение вида:

$$\frac{W(\tau) - W_{\text{равн}}}{W_{\text{н}} - W_{\text{равн}}} = exp(-K \cdot \tau^{n})$$

Где: $W_{\text{равн}}$ - равновесное влагосодержание материала (для вакуума $W_{\text{равн}} \approx 0$)

K — обобщенный коэффициент скорости сушки, мин$^{-1}$;

n — показатель степени, учитывающий геометрию материала и характер связи влаги с материалом [5, 10, 9].

В результате нелинейной регрессионной обработки данных на ЭВМ получены эмпирические значения коэффициентов для оптимального режима (P = 6 кПа, T = 52 °C): K = 0,0145 мин$^{-1}$, n = 1,12. Коэффициент детерминации модели составил R^2=0,988, что указывает на высокую адекватность математического описания реальному физическому процессу.

Результаты и обсуждение

Для подтверждения промышленной применимости и эффективности разработанного вакуумного метода были проведены опытно-промышленные размотки партий коконов на автоматическом кокономотальном станке [2, 6, 4]. Качественные показатели шелка-сырца оценивались в лаборатории по стандартным методикам ГОСТ. Сравнительные данные представлены в таблице 1.

Таблица 1. Комплексные показатели эффективности процессов переработки коконов

Наименование технологического, физико-механического или экономического параметра	**Базовый конвективный метод (Сушилка СКБ-45)**	**Разработанный вакуумный метод (Вакуум-ИК установка)**	**Абсолютное или относительное изменение**
Параметры рабочей среды:			
Давление в зоне обработки, кПа	101,32	6,00	-95,32 кПа
Максимальная температура агента, °C	115,0	52,0	На 63,0 °C ниже
Временные параметры:			
Длительность замаривания, мин	15,0	8,0	Снижение в 1,87 раза
Общая продолжительность сушки, мин	840,0	180,0	Сокращение в 4,66 раза
Энергетические показатели:			
Удельный расход тепла, МДж/кг	12,4	4,2	Снижение на 66,1%
Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/кг	3,20	2,10	Снижение на 34,4%
Технологические показатели размотки:			
Выход шелка-сырца, % от сухой массы	36,20	40,70	+4,50% (абс.)
Общая длина коконной нити, м	980,0	1250,0	+27,5%
Непрерывно разматываемая длина нити, м	680,0	1040,0	+52,9%

Наименование технологического, физико-механического или экономического параметра	Базовый конвективный метод (Сушилка СКБ-45)	Разработанный вакуумный метод (Вакуум-ИК установка)	Абсолютное или относительное изменение
Коэффициент разматываемости коконов, %	69,4	83,2	+13,8%
Обрывность нити на 100 кг сырья, шт.	14,0	5,0	Снижение в 2,8 раза
Физико-механические свойства нити:			
Линейная плотность (титр), текс	3,22	3,24	Стабилен
Относительная разрывная нагрузка, сН/текс	34,5	41,2	Увеличение на 19,4%
Разрывное удлинение, %	18,2	22,4	Увеличение на 23,0%

Анализ данных таблицы 1 позволяет сделать вывод о неоспоримом преимуществе вакуумного метода по всем ключевым позициям. Прирост выхода шелка-сырца на 4,5 % обеспечивает колоссальный экономический эффект в масштабах промышленного производства (сотни тысяч долларов на тонну готовой продукции). Рост непрерывно разматываемой длины нити с 680 до 1040 метров означает, что перезаправка автоматов происходит значительно реже, производительность труда операторов кокономотания возрастает, а количество узлов на нити минимизируется, что резко переводит готовую продукцию в более высокие международные классы качества (4А, 5А, 6А).

Обсуждение физико-химических изменений в структуре шелка

Для объяснения феномена столь резкого улучшения механических и технологических свойств коконной нити после вакуумной обработки были проведены исследования методом ИК-фурье-спектроскопии и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ).

При конвективной высокотемпературной сушке (T=110…115 °С) происходит тепловое старение макромолекул серицина. Молекулы серицина переходят из нативной неупорядоченной конформации (статистический клубок) в жесткую β-структуру складчатого слоя. Это приводит к потере растворимости наружных слоев серицина. При последующей технологической операции — варке коконов перед размоткой — такой «пережженный» серицин растворяется неравномерно, кусками. Приходится увеличивать температуру варочной среды и добавлять ПАВ, что частично разрушает уже фиброиновое ядро нити, ослабляя её.

В вакуумной установке температура сырья никогда не превышает критическую точку денатурации (52 °С). ИК-спектры вакуумных коконов показали полное сохранение полос поглощения Амид I (1645 $см^{-1}$) и Амид II (1530 $см^{-1}$), отвечающих за нативную аморфно-глобулярную структуру серицина.

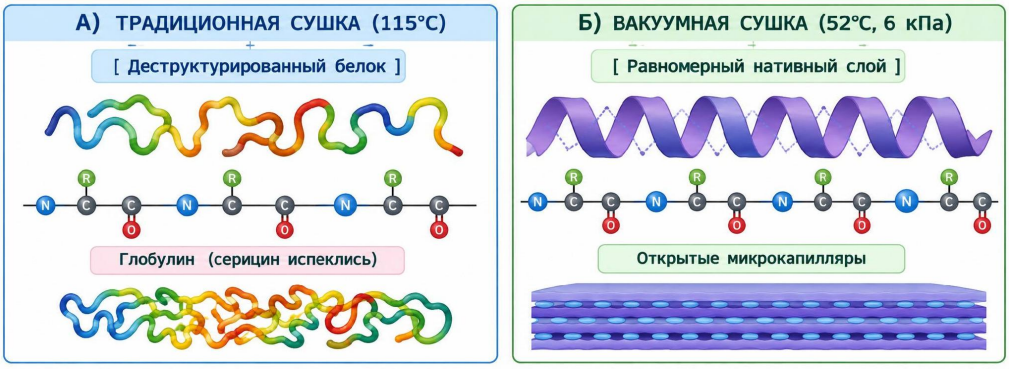


Рисунок 2. Схематическое представление предполагаемых изменений микроструктуры поверхности шелковой нити при конвективной и вакуумной сушке

Схематическое представление предполагаемых изменений микроструктуры поверхности шелковой нити при различных способах обработки приведено на рисунке 2. Схема иллюстрирует возможные различия в состоянии поверхности нити после конвективной и вакуумной сушки. При этом представленная иллюстрация носит концептуальный характер и не является непосредственным результатом сканирующей электронной микроскопии. Для подтверждения морфологических изменений поверхности нити необходим анализ реальных СЭМ-микрофотографий образцов, обработанных различными методами. Предполагаемое влияние режима сушки на технологические свойства коконной нити следует рассматривать совместно с экспериментальными данными о её разматываемости, обрывности и физико-механических характеристиках.

Выводы

1. Теоретически обоснован и практически реализован инновационный способ совмещенной морки и сушки коконов тутового шелкопряда в вакуум-термической установке. Метод базируется на явлении декомпрессионного шока для замаривания куколок и баротермического внутриобъемного вскипания влаги для её удаления.

2. Установлены оптимальные технологические параметры ведения процесса: глубина остаточного разрежения в камере Pост=6, 0 кПа, максимальная температура нагрева материала за счет ИК-излучателей спектра λ = 2,8 мкм составляет 52 °С. Этот режим гарантирует 100 % замаривание куколок в течение первых 8 минут и сокращает общее время сушки до 180 минут (в 4,6 раза быстрее базового метода).

3. Разработана адекватная математическая модель кинетики вакуумной сушки на основе уравнения нелинейной экспоненциальной регрессии (R^2 = 0,988), позволяющая прогнозировать текущую влажность коконов и автоматизировать управление промышленными вакуумными установками.

4. Экспериментально доказано существенное улучшение физико-механических и текстильных свойств шелковой нити: выход шелка-сырца увеличился на 4,5 %, непрерывно разматываемая длина выросла на 52,9 % (до 1040 м), а разрывная прочность нити возросла на 19,4 % за счет предотвращения термической денатурации белковых фракций серицина.

5. Экономические расчеты подтвердили высокую энергоэффективность технологии: за счет снижения температурных режимов и сокращения времени цикла удельный расход тепловой энергии снизился на 66,1 %, а электроэнергии — на 34,4 %. Это делает разработанный метод перспективным для широкого внедрения на шелководческих и кокон перерабатывающих предприятиях.

Список литературы

1. Алимов О.А., Эрканов Х.С. [Разработка конструкции вакуумной сушилки для термолабильных материалов капиллярно-пористой структуры] // Вестник Ташкентского государственного технического университета. – 2021. – № 2. – С. 45–51.
2. Ахмедов М.К. [Технология кокономотания.]. – Ташкент: Укитувчи, 1995. – 312 с.
3. Гинзбург А.С. [Инфракрасная техника в пищевой и легкой промышленности.]. – М.: Пищевая промышленность, 1966. – 405 с.
4. Iizuka, M. Iga, E. Okada, K. Takahashi, Y. Kirisaki, and J. Takizawa, Air-heated decompression drying of silkworm cocoons at low temperature // The Journal of Silk Science and Technology of Japan, vol. 32, P. 11–19. – 2024. – T. 32. – P. 11–19.
5. Лыков А.В. [Теория сушки]. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.
6. Миразизов Х.А., Алимов О.А. [Интенсификация процессов первичной переработки шелкового сырья методами вакуумной техники] // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2018. – № 3 (375).
7. Рубинов Э.Б. [Физико-механические свойства коконов и нитей тутового шелкопряда]. – М.: Легкая индустрия, 1982. – 234 с.
8. Lee H.J., Kim B.Y. Structural changes of sericin protein during high-temperature thermal processing // International Journal of Biological Macromolecules. – 2020. – T. 154. – P. 1122–1129.
9. Samandarov D.I. Experimental studies of infrared-ultrasonic drying of mulberry silkworm cocoons // Universum: технические науки. – 2024. – № 5 (122).
10. Zhang Y., Shafi M. Silk cocoon processing technology and vacuum drying modeling // Journal of Textile Research. – 2022. – T. 43, № 2. – P. 85–91.

References

1. Alimov, O.A. [Development of the design of a vacuum dryer for thermolabile materials with a capillary-porous structure] / O.A. Alimov, Kh. S. Erkanov // Vestnik Tashkentskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2021. – No. 2. – P. 45–51. (In Russ.).
2. Akhmedov, M.K. [Cocoon reeling technology] / M.K. Akhmedov. – Tashkent: Ukituvchi, 1995. – 312 P. (In Russ.).
3. Ginzburg, A.S. [Infrared technology in the food and light industries] / A.S. Ginzburg. – Moscow: Pishchevaya promyshlennost’, 1966. – 405 P. (In Russ.).

4. Iizuka, M. Air-heated decompression drying of silkworm cocoons at low temperature / M. Iizuka, E. Iga, K. Okada, Y. Takahashi, Y. Kirisaki, J. Takizawa // The Journal of Silk Science and Technology of Japan. – 2024. – Vol. 32. – P. 11–19.
5. Lykov, A.V. [Theory of drying] / A.V. Lykov. – Moscow: Energiya, 1968. – 472 P. (In Russ.).
6. Mirazizov, Kh. A. [Intensification of primary processing of silk raw materials using vacuum technology] / Kh. A. Mirazizov, O.A. Alimov // Izvestiya vuzov. Tekhnologiya tekstil’noy promyshlennosti. – 2018. – No. 3 (375). (In Russ.).
7. Rubinov, E.B. [Physical and mechanical properties of silkworm cocoons and threads] / E.B. Rubinov. – Moscow: Legkaya industriya, 1982. – 234 P. (In Russ.).
8. Lee, H.J. Structural changes of sericin protein during high-temperature thermal processing / H.J. Lee, B.Y. Kim // International Journal of Biological Macromolecules. – 2020. – Vol. 154. – P. 1122–1129.
9. Samandarov, D.I. Experimental studies of infrared-ultrasonic drying of mulberry silkworm cocoons / D.I. Samandarov // Universum: tekhnicheskie nauki. – 2024. – No. 5 (122). (In Russ.).
10. Zhang, Y. Silk cocoon processing technology and vacuum drying modeling / Y. Zhang, M. Shafi // Journal of Textile Research. – 2022. – Vol. 43, No. 2. – P. 85–91.

Статья поступила в редакцию: 24.10.2026
Статья принята к публикации: 08.11.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 665.335.9.094.1

DOI: 10.32743/UniTech.2026.152.11.23718

Изучение переэтерифицирующей способности дисперсных катализаторов

Суванова Фаёза Усмановна
проф.
Каршинский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Карши
E-mail: doc.fayoza@mail.ru

Study of the transesterifying ability of dispersed catalysts

Suvanova Fayoza Usmanovna
Prof., Karshi State Technical University
Republic of Uzbekistan, Karshi

Аннотация

В статье представлены результаты исследования каталитической активности дисперсных катализаторов. Применяемые в масложировой промышленности дисперсные никелевые катализаторы очень чувствительны к сопутствующим веществам, содержащимся в хлопковом масле, которые остаются в масле и после рафинации. В ходе самого процесса гидрирования также образуются ряд веществ, отравляющих катализатор.

В рамках исследования данного процесса с использованием различных катализаторов и разработки способов его интенсификации с применением детоксикантов были выявлены изменения жирнокислотного состава триглицеридов. В частности, было обнаружено, что вместе с насыщением ненасыщенных жирных кислот, входящих в состав триглицеридов хлопкового масла, происходит их переэтерификация – изменение положения ацильных остатков жирных кислот. Исследования саломасов, полученных на различных катализаторах и введением в гидрируемую среду цеолита NaX, показали, что степень переэтерификации зависит от вида применяемого катализатора. Наибольшая степень переэтерификации наблюдалась при использовании катализаторов Ni:Cu=3:1 (НМ-4) и никель-кизельгурового катализатора ГМ-3. Изменение позиционного распределения жирных кислот в молекулах триацилглицеринов сопровождается изменением физико-химических характеристик жиров, в частности консистенции саломаса. Это особенно актуально при получении жиров специального назначения.

Библиографическое описание: Суванова Ф.У. Изучение переэтерифицирующей способности дисперсных катализаторов // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23718

Abstract

The article presents the findings of an investigation into the catalytic activity of heterogeneous dispersed catalysts. Dispersed nickel catalysts widely employed in the fats and oils industry are highly susceptible to catalyst-poisoning compounds present in cottonseed oil, some of which persist even after the refining process. Furthermore, additional substances capable of deactivating the catalyst are generated during the hydrogenation process itself.

As part of an investigation into the hydrogenation process using different catalysts and the development of intensification strategies involving detoxifying agents, changes in the fatty acid composition and distribution of triacylglycerols were identified. In particular, the findings revealed that, alongside the hydrogenation of unsaturated fatty acids in cottonseed oil triacylglycerols, interesterification also occurs, involving the redistribution of fatty acid acyl groups among the glycerol positions. An analysis of the hydrogenated fats (hardened oils) produced using different catalysts, with NaX zeolite introduced into the hydrogenation medium, demonstrated that the extent of interesterification depends on the type of catalyst employed.

The highest degree of interesterification was observed when the Ni–Cu catalyst with a Ni ratio of 3:1 (NM-4) and the nickel–kieselguhr catalyst GM-3 were used. Changes in the positional distribution of fatty acids within triacylglycerol molecules lead to alterations in the physicochemical properties of fats, particularly the consistency of hydrogenated fats (hardstocks). This effect is especially important in the production of specialty fats, where the required structural and textural properties must be achieved.

Ключевые слова: гидрогенизация, переэтерификация, катализатор, жирнокислотный состав, триглицериды, детоксиканты, цеолит.

Keywords: hydrogenation, interesterification, catalyst, fatty acid composition, triglycerides, detoxifying agents, zeolite.

Введение

В различных отраслях промышленности – пищевой, косметической, фармацевтической, производстве бытовой техники и других технических отраслях широко применяют твердые и жидкие жиры. Главное различие в их применении обусловлено химическим составом: твердые жиры состоят преимущнственно из насыщенных жирных кислот, в состав жидких масел входят ацилы ненасыщенных жирных кислот. Для получения спредов. маргаринов, шоколада, кондитерских жиров, в производстве косметических средств, суппозиториев, мазевых основ используют твердые жиры, которые нашли широкое применение благодаря своей консистенции, пластичности, устойчивости к окислению и способности придавать продуктам необходимую структуру [1,6].

Существуют различные способы получения таких жиров. Одним из основных методов получения модифицированных жиров, приводящих к изменению их физико-химических показателей и, в частности, кривых плавления, являются процессы гидрогенизации и переэтерификации растительных масел.

Целью данной работы являлось изучение процесса гидрогенизации хлопкового масла на различных катализаторах и разработка способов его интенсификации с использованием различных (в том числе, местных) детоксикантов и их композиций. Однако процесс гидрогенизации не является простым насыщением двойных связей водородом в растительных маслах в присутствии специального катализатора. Этот процесс сопровождается протеканием различных сопутствующих реакций. К примеру, наряду с насыщением ненасыщенных жирных кислот водородом происходит их миграция, которая также влияет на формирование консистенции получаемого саломаса и его стойкость к окислению при хранении. В результате этих реакций, при которых триглицериды обмениваются (внутри и межмолекулярно) остатками жирных кислот, образуются триглицериды нового жирнокислотного состава, т.е протекает процесс переэтерификации [8-10].

Процесс обмена ацильными группами носит случайный характер, но при этом первоначальное распределение жирных кислот в триглицеридах изменяется как и их физико-химические характеристики. В отличие от гидрогенизации этерификация не влияет на степень насыщения и не вызывает изомеризацию двойных связей в жирных кислотах, что позволяет получать продукты, свободные от трансизомеров [4,7]. В связи с этим в рамках настоящего исследования проведена сравнительная оценка степени переэтерификации хлопкового масла в процессе его гидрирования при использовании различных катализаторов. В гидрируемую среду вводили цеолит NaX в количестве 1,5 %.

Материалы и методы

При выполнении работы для достижения поставленной цели были изучены и проведена сравнительная оценка физико-химических и органолептических показателей хлопкового масла и модифицированных жиров, полученных на различных катализаторах; анализ жирнокислотного состава триацилглицеринов исходного сырья и полученных саломасов; была определены переэтерифицирующая активность разработанных дисперсных катализаторов [4]. Исследования физико-химических и органолептических показателей проводили по общепринятой методике [2,9]. Определение йодного числа проводили по методике ISO 3961.2024 «Жиры и масла животные и растительные. Определение йодного числа.». Кислотное число определяли согласно ISO 660.2020 «Животные и растительные жиры и масла. Определение кислотного числа и кислотности.»; температуру плавления, твердость продуктов определяли согласно существующим стандартам [3].

Жирнокислотный состав масел и жиров определяли методом газожидкостной хроматографии. Перед определением жирнокислотного состава исследуемых образцов жирные кислоты предварительно переводили в метиловые эфиры. Полученные хромотограммы анализировали, идентифицирую метиловые эфиры жирных кислот, а их количественное содержание определяли на основании площадей соответствующих пиков с использованием стандартной метидики.

Результаты и обсуждение

Как отмечалось выше, в процессе гидрогенизации масел и жиров наряду с насыщением жирных кислот водородом происходит их миграция (т.е. перераспределение радикалов жирных кислот между молекулами глицеридов одного жира или смесей различных жиров), которая формирует консистенцию получаемого саломаса и его устойчивость к окислению при хранении. В этой связи была изучена степень переэтерификации (П) хлопкового масла в присутствии различных катализаторов и детоксикантов. Степень переэтерификации определяли по следующей формуле:

$$П = \frac{\Delta МГ}{МГ_0} 100(\%),$$

где *ΔМГ* – абсолютная разница содержания пальмитиновой кислоты до и после переэтерификации (или гидропереэтерификации) в Sn-2 положении; $МГ_0$ – начальное содержание пальмитиновой кислоты в Sn-2 положении.

Результаты анализа жирно кислотного состава триглицеридов исходного сырья и саломасов, полученных на его основе представлены в табл.1.

Таблица 1. Жирнокислотный состав триглицеридов рафинированного хлопкового масла и саломасов, полученных на его основе

Продукт исследования	Жирные кислоты	Содержание ацилов, моль,%			
		ТАГ	Sn-1	Sn-2	Sn-3
Рафинированное хлопковое масло, Й.ч.=110,4 % J_2, К.ч.=0,3 мг КОН, Цв.=12 кр.ед. при 35 жел.	$C_{16:0}$	28,8	44,0	4,7	36,9
	$C_{18:0}$	1,5	2,4	0,3	0,3
	$C_{18:1}$	19,2	21,0	23,0	15,4
	$C_{18:2}$	50,5	32,6	72,0	47,4
Саломас, полученный на Ni:Cu (3:1) катализаторе НМ-4	$C_{16:0}$	29,4	41,8	5,4	40,0
	$C_{18:0}$	6,2	7,0	4,8	6,4
	$C_{18:1}$	50,6	39,9	69,5	45,1
	$C_{18:2}$	13,3	11,3	20,3	8,5
Саломас, полученный на никель-кизельгуровом катализаторе ГМ-3	$C_{16:0}$	29,6	40,5	5,6	40,3
	$C_{18:0}$	4,9	6,1	5,0	7,3
	$C_{18:1}$	51,1	43,3	67,7	44,7
	$C_{18:2}$	14,4	10,1	21,7	7,7
Саломас, полученный на Ni:Cu (1:1) катализаторе	$C_{16:0}$	29,0	44,8	5,0	37,3
	$C_{18:0}$	5,5	7,2	4,7	4,5
	$C_{18:1}$	49,5	40,2	70,3	42,4
	$C_{18:2}$	16,0	7,1	20,0	15,8
$C_{18:0}$ – общее содержание стеариновой и миристиновой кислот. $C_{18:1}$ – общее содержание олеиновой и пальмитолеиновой кислот.					

Как видно из табл.1 в рафинированном хлопковом масле наблюдается неравномерное распределение ацилов в триглицеридах. Особенно существенные различия наблюдаются для $C_{16:0}$, $C_{18:1}$ и $C_{18:2}$. В Sn-2 положении предпочтительно располагаются $C_{18:1}$ и $C_{18:2}$ кислоты, а в Sn-1 ацилы насыщенных кислот ($C_{16:0}$ и $C_{18:0}$).

Исследование саломасов, полученных на Ni:Cu (1:1), Ni:Cu (3:1)-НМ-4 и никель-кизельгуровом катализаторе -ГМ-3, показало, что в гидрогенизатах жирные кислоты могут располагаться произвольно в различных положениях независимо от близости значений по температуре плавления (32 – 33 ^{0}C) и твердости (330 – 350 г/см). Наибольшее количество жирных кислот $C_{16:0}$ располагается в Sn-1 положении. Например, на Ni:Cu (1:1) катализаторе саломас в Sn-1 положении содержит кислоты $C_{16:0}$ и $C_{18:0}$ в количестве 44,8 и 7,2 соответственно. Наибольшая этерификация жирных кислот происходит на катализаторах ГМ-3 и НМ-4 (табл.2).

В связи с этим, при непрерывном гидрировании хлопкового масла и других жиров в трех автоклавах для повышения качества получаемого саломаса целесообразно возвращать из саломасоприемника часть отработанного катализатора и саломаса в первый и второй автоклавы, что обеспечивает более интенсивное протекание переэтерификации [4,5].

Таблица 2. Переэтерифицирующая активность Ni:Cu (1:1), Ni:Cu (3:1)- НМ-4 и ГМ-3 катализаторов при гидрировании хлопкового масла

Продукт исследования	$МГ_0$	МГ	ΔМГ	П, %
Саломас, полученный на Ni:Cu (3:1)-НМ-4 катализаторе	4,7	5,4	0,7	15,0
Саломас, полученный на никель-кизельгуровом ГМ-3 катализаторе	4,7	5,6	0,9	19,2
Саломас, полученный на Ni:Cu (1:1) катализаторе	4,7	5,0	0,3	6,4

Заключение

Как известно, переэтерификация - это химический процесс перераспределения жирнокислотного состава между молекулами триглицеридов масел и жиров. Процесс сам по себе не означает увеличение или уменьшение содержания ненасыщенных жирных кислот, преимущественно изменяет распределение ацилов между молекулами триглицеридов. Он может протекать как при гидрировании одного вида масла, так и его смеси с другими жирами, что позволяет расширить сырьевую базу и ассортимент вырабатываемых саломасов.

Таким образом, используя катализатор НМ-4 и цеолит можно получать высокотвердые жиры для кондитерской и косметической промышленности. Данный катализатор может быть использован также для получения низкойодного саломаса, вырабатываемого путем гидрирования смеси животных жиров с хлопковым маслом и применяемого в качестве основы для производства косметического стеарина. На основе результатов исследования механических добавок в виде детоксикантов при гидрировании масел были разработаны высокоэффективные катализаторы на носителях. Данные катализаторы прошли опытно промышленные испытания в условиях Ферганского МЖК.

Список литературы

1. О.А. Ивашина, Л.В. Терещук, К.В. Старовойтова, М.А. Тарлюн. Переэтерификация как альтернативный способ модификации жиров, свободных от трансизомеров // Техника и технология пищевых производств. – 2015. – № 3 (38). – С. 18–23.
2. Р. О’Брайен. Жиры и масла. Производство, состав и свойства, применение. /Р. О’Брайен; пер. с английского 2-го изд. В.Д. Широкова, Д.А. Бабейкиной, Н.С. Селивановой, Н.В. Маглы – Санкт. – Петербург: Профессия, 2007. – 752 с.
3. Руководство по методам исследования, технохимическому контролю и учету производства в масложировой промышленности // под общ. ред. В.П. Ржехина и А.Г. Сергеева. – Л.: ВНИИЖ, т.1, 1967. – Т. 1. – 585 с.
4. Суванова Ф.У., Саидов А. Получение модифицированных жиров с улучшенными качественными показателями // Universum: технические науки. – 2024. – № 10 (127). – С. 33–37. – DOI: 10.32743/UniTech.2024.127.10.18459.
5. Karupaiah T., Sundram K. Effects of stereospecific positioning of fatty acids in triacylglycerol structures in native and randomized fats: a review of their nutritional implications // Nutrition & Metabolism. – 2007. – T. 4, № 1. – P. 1–17. – DOI: 10.1186/1743-7075-4-16.
6. Kadhum A.A. H., Shamma M.N. Edible lipids modification processes: A review // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. – 2017. – T. 57, № 1. – P. 48–58. – DOI: 10.1080/10408398.2013.848834.
7. Song Z., Yang R., Ma C., Si T. Response Surface Methodology for Optimization of Preparation Process and Characterization of Fully Hydrogenated Cottonseed Oil // Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition). – 2023. – T. 44, № 2. – P. 39–47. – DOI: 10.16433/j.1673–2383.2023.02.006.
8. Silva T.J., Barrera-Arellano D., Ribeiro A.P.B. Margarines: Historical approach, technological aspects, nutritional profile, and global trends // Food Research International. – 2021. – T. 147. – Art. 110486. – DOI: 10.1016/j.foodres.2021.110486.
9. Экхард, Ф. Структурный жир с высоким содержанием стеариновой кислоты и спред на его основе / Ф. Экхард // Масла и жиры. – 2014. – № 5/6. – С. 16–18.
10. Tereshchuk, L. Theoretical and Practical Aspects of the Development of a Balanced Lipid Complex of Fat Compositions / L. Tereshchuk // Food and Raw Materials. – 2014. – № 2. – P. 59–67.

References

1. Ivashina, L.V., Tereshchuk, K.V., Starovoitova, M.A. Tarlyun. Interesterification as an Alternative Method for Modifying Fats Free from Trans Isomers // Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv. – 2015. – No. 3 (38). (In Russ.).
2. O’Brajen R. [O'Brien, R. Fats and Oils. Production, Composition and Properties, Application] / R. O’Brajen; perevod s anglijskogo 2-go izdaniya V.D. Shirokova, D.A. Babeykinoy, N.S. Selivanovoy, N.V. Magli. – Sankt. – Peterburg: Professiya, 2007. – 751 s (In Russ.).

3. [Manual on Methods of Research, Technochemical Control and Production Accounting in the Oil and Fat Industry] // pod red. V.P. Rjexina i A.G.
4. Sergeeva. L.: VNIIZh, Vol.1, 1967. -585 (In Russ.).
5. Suvanova F.U., Saidov A. [Production of Modified Fats with Improved Quality Indicators] // Universum: tekhnicheskie nauki. – 2024. – No. 10 (127). – DOI: 10.32743/UniTech. 2024.127.10.18459. (In Russ.).
6. Karupaiah T., Sundram K. Effects of stereospecific positioning of fatty acids in triacylglycerol structures in native and randomized fats: a review of their nutritional implications // Nutrition & Metabolism. – 2007. – Vol. 4, No. 1. – P. 1–17. – DOI: 10.1186/1743-7075-4-16.
7. Kadhum A.A. H., Shamma M.N. Edible lipids modification processes: A review // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. – 2017. – Vol. 57, No. 1. – P. 48–58. – DOI: 10.1080/10408398.2013.848834.
8. Song Z., Yang R., Ma C., Si T. Response Surface Methodology for Optimization of Preparation Process and Characterization of Fully Hydrogenated Cottonseed Oil // Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition). – 2023. – Vol. 44, No. 2. – P. 39–47. – DOI: 10.16433/j.1673–2383.2023.02.006.
9. Silva T.J., Barrera-Arellano D., Ribeiro A.P.B. Margarines: Historical approach, technological aspects, nutritional profile, and global trends // Food Research International. – 2021. – Vol. 147. – Art. 110486. – DOI: 10.1016/j.foodres.2021.110486.
10. Eckhard, F. Structural Fat with a High Stearic Acid Content and a Spread Based on It // Masla i Zhiry [Oils and Fats]. – 2014. – No. 5/6. – P. 16–18. (In Russ.).
11. Song Z., Yang R., Ma C., Si T. Optimization of Preparation and Characterization of Hydrogenated Cottonseed Oil by Response Surface Methodology // Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition). – 2023. – Vol. 44, No. 2. – P. 39–48. – DOI: 10.16433/ j.1673–2383.2023.02.006.
12. Tereshchuk L. Theoretical and Practical Aspects of the Development of a Balanced Lipid Complex of Fat Compositions // Food and Raw Materials. – 2014. – No. 2. – P. 59–67.

Статья поступила в редакцию: 24.06.2026
Статья принята к публикации: 31.10.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 664.8+621.365

Совершенствование технологии конвективной сушки овощей под воздействием центробежной силы

Фамилзаде Рашад
соискатель
Ташкентский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: z.q.ergasheva@gmail.com

Improving of the technology of convective drying of vegetables under the influence of centrifugal force

Familzade Rashad
Researcher
Tashkent State Technical University
Republic of Uzbekistan, Republic of Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

В статье рассмотрены современные подходы к совершенствованию технологии конвективной сушки овощного сырья с применением центробежной силы как дополнительного физического воздействия. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности процессов обезвоживания растительных материалов при сохранении их пищевой ценности, качества и снижении энергетических затрат. Проанализированы особенности традиционной конвективной сушки, основные ограничения данного метода, связанные с длительностью процесса, неравномерностью удаления влаги и возможными потерями биологически активных компонентов. Рассмотрены структурные особенности овощного сырья, влияющие на механизм влагопереноса, а также роль центробежного ускорения в интенсификации внутренней миграции влаги. Проведен анализ механизмов воздействия центробежной силы, включающих снижение сопротивления внутренней диффузии, ускорение капиллярного перемещения влаги и улучшение условий тепло- и массообмена. На основе анализа литературных данных показано, что применение комбинированной конвективно-центробежной сушки позволяет сократить продолжительность процесса, повысить равномерность обезвоживания и улучшить эксплуатационные характеристики сушильного оборудования. Показана перспективность использования данного метода в пищевой промышленности для создания энергоэффективных технологий переработки овощного сырья. Полученные результаты могут

Библиографическое описание: Фамилзаде Р. Совершенствование технологии конвективной сушки овощей под воздействием центробежной силы // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23741

быть использованы при разработке новых конструкций сушильных установок и совершенствовании технологических режимов обработки растительных продуктов. Получено условие механического удаления влаги из капилляров материала в центробежном поле и предложена модель кинетики сушки, учитывающая центробежный фактор. Расчётами показано, что при радиусе вращения 0,25 м и частоте 300 об/мин центробежное давление превышает капиллярное лишь для пор радиусом более ≈53 мкм, поэтому центробежное поле интенсифицирует преимущественно удаление свободной влаги и внешний массообмен.

Abstract

The article discusses modern approaches to improving the technology of convective drying of vegetable raw materials using centrifugal force as an additional physical influence. The relevance of the study is determined by the need to increase the efficiency of dehydration processes for plant materials while maintaining their nutritional value, quality characteristics, and reducing energy consumption. The paper analyzes the features of traditional convective drying and the main limitations of this method, including long processing times, uneven moisture removal, and possible losses of biologically active components. The structural characteristics of vegetable raw materials affecting moisture transfer mechanisms are considered, as well as the role of centrifugal acceleration in intensifying internal moisture migration. The mechanisms of centrifugal force influence, including reducing internal diffusion resistance, accelerating capillary moisture movement, and improving heat and mass transfer conditions, are analyzed. Based on the analysis of published data, it is shown that the use of combined convective-centrifugal drying makes it possible to reduce processing time, improve dehydration uniformity, and enhance the performance characteristics of drying equipment. The prospects of applying this method in the food industry for developing energy-efficient technologies for vegetable processing are demonstrated. The obtained results can be used for designing new drying equipment and improving technological parameters of plant product processing. A condition for mechanical removal of moisture from material capillaries in a centrifugal field is derived, and a drying kinetics model accounting for the centrifugal factor is proposed. Calculations show that at a rotation radius of 0.25 m and 300 rpm the centrifugal pressure exceeds the capillary pressure only for pores larger than ≈53 μm; therefore, the centrifugal field mainly intensifies the removal of free moisture and external mass transfer.

Ключевые слова: овощи, конвективная сушка, центробежная сила, влагоперенос, энергосбережение, интенсификация процесса, сушильная установка, центробежный фактор, капиллярное давление, кинетика сушки.

Keywords: vegetables, convective drying, centrifugal force, moisture transfer, energy saving, process intensification, drying equipment, centrifugal factor, capillary pressure, drying kinetics.

Введение

Сушка овощей является одним из наиболее распространённых методов консервирования растительного сырья. Данный процесс обеспечивает снижение массовой доли влаги до уровня, препятствующего развитию микроорганизмов и протеканию

нежелательных биохимических реакций. Высушенные овощи отличаются длительным сроком хранения, удобством транспортировки и возможностью последующего использования в пищевой промышленности [1, 8].

Несмотря на широкое применение, традиционная конвективная сушка обладает рядом существенных недостатков. Главным из них является высокая продолжительность процесса, обусловленная ограниченной скоростью внутренней диффузии влаги из центральных слоёв материала к поверхности [3]. Кроме того, длительное воздействие повышенных температур может приводить к ухудшению цвета, аромата, текстуры и снижению содержания биологически активных веществ.

Современное развитие пищевой инженерии направлено на поиск способов ускорения тепло- и массообмена без ухудшения качества продукта. Одним из перспективных методов является применение центробежной силы в процессе конвективной сушки [12, 9]. Воздействие центробежного ускорения позволяет усилить движение влаги внутри материала и интенсифицировать её перенос к поверхности.

Математическое описание кинетики конвективной сушки овощей, как правило, основано на уравнении диффузии влаги [6, 10] и эмпирических тонкослойных моделях Ньютона (Льюиса), Хендерсона-Пабиса и Пейджа [4, 11, 14]. Однако в этих моделях влияние центробежного поля явным образом не учитывается, а количественные оценки эффекта центробежного воздействия в литературе носят обобщённый характер и не связаны с параметрами структуры материала (размером пор, длиной пути миграции влаги) и режимом вращения рабочего органа. Параллельно развиваются альтернативные энергоэффективные методы – инфракрасная, микроволновая, радиочастотная и солнечная сушка [15]; на их фоне конвективно-центробежная сушка выделяется простотой аппаратурного оформления и возможностью модернизации существующих конвективных сушилок.

Целью настоящей работы является анализ способов совершенствования технологии конвективной сушки овощей под воздействием центробежной силы и оценка эффективности данного подхода [5]. Для достижения цели решались следующие задачи: 1) проанализировать механизмы влагопереноса в овощном сырье при конвективной сушке; 2) получить расчётные соотношения, связывающие режим вращения рабочего органа с центробежным давлением в капиллярах материала и интенсивностью внешнего массообмена; 3) определить диапазон режимов, при которых центробежное воздействие существенно влияет на процесс; 4) разработать методику экспериментального исследования кинетики конвективно-центробежной сушки.

Научная новизна работы состоит в том, что для конвективно-центробежной сушки овощей получено условие механического удаления влаги из капилляров материала (критический радиус пор), зависящее от частоты вращения, радиуса рабочего органа и размеров частиц, и предложена форма модели кинетики сушки, в которой константа скорости сушки является функцией центробежного фактора.

Материалы и методы

В качестве материалов исследования использованы научные публикации и результаты исследований в области технологии сушки растительного сырья, тепло- и массопереноса, а также данные о характеристиках овощей как объектов обезвоживания. В работе

применялись методы сравнительного анализа традиционной конвективной сушки и комбинированного процесса с использованием центробежного воздействия, а также теоретического анализа механизмов переноса влаги, влияния технологических параметров на интенсивность сушки и оценки эффективности применения центробежной силы для интенсификации процесса.

Теоретический анализ выполнен на основе положений теории тепло- и массопереноса во влажных капиллярно-пористых телах [8, 6, 10]. Расчёты проведены для следующих исходных условий: радиус вращения рабочего органа R = 0,25 м; частота вращения n = 0… 300 об/мин; характерный размер частицы в радиальном направлении l = 10 мм; плотность воды ρ = 1000 кг/м³; поверхностное натяжение воды при 60 °C σ ≈ 0,066 Н/м; краевой угол смачивания θ ≈ 0; скорость сушильного агента относительно неподвижного лотка v_0 = 2 м/с; конечная влажность продукта 8 %.

Влагосодержание приводится к безразмерному виду $MR = (M - M_e)/(M_0 - M_e)$, где M, M_0, M_e – текущее, начальное и равновесное влагосодержание, кг/кг с.в. Экспериментальные данные аппроксимируются моделями Льюиса, Хендерсона–Пабиса и Пейджа; адекватность оценивается по коэффициенту детерминации R^2, среднеквадратичной ошибке RMSE и критерию χ^2 [11, 14]. Удельные энергозатраты определяются по показаниям счётчика электроэнергии, отнесённым к массе испарённой влаги.

Результаты и обсуждение

Конвективная сушка представляет собой процесс удаления влаги из материала путём контакта его поверхности с нагретым газообразным агентом, чаще всего воздухом. Передача теплоты от воздуха к продукту вызывает испарение влаги с поверхности, после чего начинается её миграция из внутренних слоёв [8,13].

Процесс обезвоживания включает два взаимосвязанных этапа: подвод теплоты к материалу, перенос влаги из внутренних слоёв к поверхности.

На начальной стадии скорость сушки определяется интенсивностью испарения свободной влаги. В этот период температура материала близка к температуре мокрого термометра [8,13]. После удаления поверхностной влаги начинается период падающей скорости сушки, при котором основным лимитирующим фактором становится внутренний массоперенос.

Овощи характеризуются сложной капиллярно-пористой структурой. Влага в них содержится в различных формах, таких как, свободная, капиллярная, осмотически связанная, адсорбционно связанная [3].

Удаление связанной влаги требует значительных энергетических затрат. Именно на данном этапе применение дополнительных физических воздействий становится особенно актуальным.

Особенности овощного сырья как объекта сушки. Овощное сырьё существенно различается по химическому составу, клеточной структуре и исходному влагосодержанию. Большинство овощей содержит от 75 до 95 % воды (табл. 1).

Таблица 1. Влагосодержание овощей и расчётные показатели их обезвоживания

Наименование овощей	Влагосодержание, %	W_1, кг влаги / кг сырья	W_2, кг влаги / кг готового продукта	q, кВт·ч / кг готового продукта
Морковь	86-89	0,86	6,36	4,24
Картофель	74-78	0,74	2,83	1,89
Лук	85-90	0,86	6,36	4,24
Томаты	92-95	0,93	13,15	8,77

Примечание: расчёт выполнен для среднего значения начальной влажности w_0 и конечной влажности wк = 8 %: $W_1 = (w_0 - wк)/(100 - wк)$; $W_2 = (w_0 - wк)/(100 - w_0)$; $q = W_2 \cdot r/3{,}6$ – теоретический расход теплоты на испарение при удельной теплоте парообразования r ≈ 2,4 МДж/кг (без учёта тепловых потерь).

Высокая влажность определяет значительные энергозатраты при сушке [5]. Дополнительной сложностью является неоднородность структуры тканей. Клеточные мембраны, межклеточные пространства и капилляры создают сложные пути миграции влаги. Как следует из табл. 1, для получения 1 кг сушёных томатов необходимо испарить более 13 кг воды, а теоретический расход теплоты только на испарение составляет около 8,8 кВт·ч на 1 кг готового продукта; фактические энергозатраты конвективных сушилок существенно выше вследствие потерь теплоты с отработанным воздухом.

При традиционной сушке часто наблюдаются образование поверхностной корки, неравномерное обезвоживание, усадка продукта, растрескивание тканей, потери витаминов [12].

Для минимизации данных недостатков необходимы методы интенсификации процесса.

Центробежная сила возникает при вращательном движении материала вокруг оси [1]. При этом на частицы продукта действует центробежная сила:

$$F = m\omega^2 r$$

где: m – масса частицы, ω – угловая скорость, r – радиус вращения. Приведённая формула описывает силу, действующую на частицу в целом; для анализа внутреннего влагопереноса необходимо рассмотреть давление, создаваемое центробежным полем в жидкости, заполняющей капилляры материала.

Под действием центробежной силы влага внутри капилляров начинает перемещаться от центра к периферии. Это приводит к ускорению внутреннего влагопереноса [7]. Основные механизмы воздействия центробежной силы уменьшение сопротивления внутренней диффузии, ускорение капиллярного перемещения влаги, разрушение застойных зон внутри структуры, увеличение площади контакта материала с воздухом, предотвращение локального перегрева

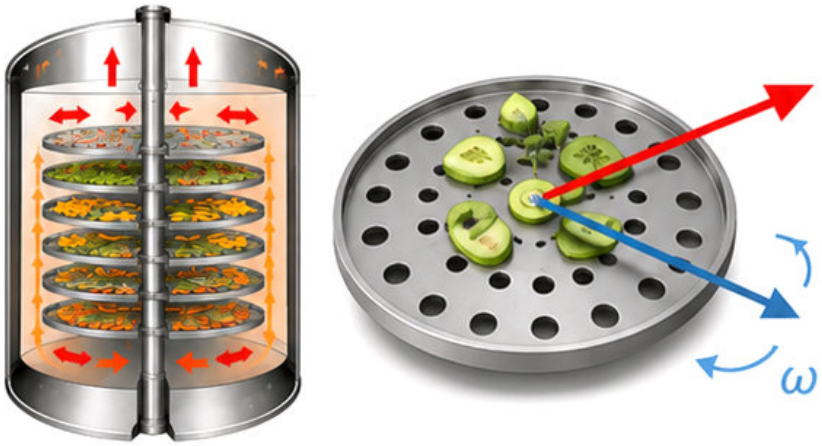


Рисунок 1. Схема конвективной сушки овощей под воздействием центробежной силы

В результате достигается более равномерная сушка по всему объёму материала.

Особенно заметный эффект наблюдается при обработке нарезанных овощей малой толщины – ломтиков, кубиков, стружки [1].

В таких установках овощное сырьё располагается на вращающемся рабочем органе – диске, барабане или роторе. Во время вращения частицы непрерывно перемещаются, изменяя положение относительно потока горячего воздуха.

Расчётная оценка влияния центробежного поля на влагоперенос

Интенсивность центробежного воздействия удобно характеризовать центробежным фактором (фактором разделения) – отношением центробежного ускорения к ускорению свободного падения [8]:

$$Fr = \frac{\omega^2 R}{g}, \quad \omega = \frac{\pi n}{30}, \tag{1}$$

где R – радиус вращения, м; n – частота вращения, об/мин; g – ускорение свободного падения, м/с².

Жидкость в капилляре радиусом гк удерживается капиллярным давлением [6]:

$$p_к = \frac{2\sigma \cos\theta}{r_к} \tag{2}$$

Центробежное давление, создаваемое в жидкости на радиальном участке длиной l (при l ⩘ R), составляет:

$$p_ц = \rho\omega^2 Rl \tag{3}$$

Механическое (без испарения) перемещение влаги к периферийной поверхности частицы возможно при рц > рк, откуда критический радиус капилляра, начиная с которого влага вытесняется центробежным полем:

$$r_к^* = \frac{2\sigma \cos\theta}{\rho\omega^2 Rl} \tag{4}$$

Кроме того, вращение рабочего органа увеличивает относительную скорость обтекания частиц сушильным агентом. Для ламинарного пограничного слоя коэффициент массоотдачи пропорционален квадратному корню из критерия Рейнольдса [8, 6], поэтому отношение коэффициентов массоотдачи при вращении и без него можно оценить как

$$\frac{\beta}{\beta_0} \approx \left(\frac{v_{\text{отн}}}{v_0} \right)^{0,5}, \qquad v_{\text{отн}} = \sqrt{{v_0}^2 + (\omega R)^2} \tag{5}$$

Оценка (5) является верхней, так как не учитывает частичное увлечение воздуха вращающимся лотком. Результаты расчёта по формулам (1)–(5) приведены в табл. 2.

Таблица 2. Расчётные параметры центробежного воздействия (R = 0,25 м; l = 10 мм)

n, об/мин	ω, рад/с	ω²R, м/с²	Fr	рц, Па	rк*, мкм	ωR, м/с	β/β₀
0	0	0	0	0	–	0	1,00
60	6,28	9,9	1,0	99	1337	1,57	1,13
120	12,57	39,5	4,0	395	334	3,14	1,36
180	18,85	88,8	9,1	888	149	4,71	1,60
240	25,13	157,9	16,1	1579	84	6,28	1,82
300	31,42	246,7	25,2	2467	53	7,85	2,01

Из табл. 2 видно, что при n ≤ 60 об/мин центробежный фактор близок к единице и влияние центробежного поля на внутренний влагоперенос пренебрежимо мало. При n = 300 об/мин центробежное давление достигает ≈2,5 кПа, что достаточно для вытеснения влаги из капилляров и межклеточных пространств радиусом более ≈53 мкм. Поскольку размеры межклеточных пространств и клеток растительных тканей составляют порядка десятков–сотен микрометров, центробежное поле способно интенсифицировать удаление свободной влаги и поверхностной плёнки жидкости в периоде постоянной скорости сушки. Удаление же осмотически и адсорбционно связанной влаги, удерживаемой в микрокапиллярах и клеточных стенках, центробежным полем практически не ускоряется: для пор радиусом 1 мкм капиллярное давление составляет ≈130 кПа, что на два порядка выше достижимого центробежного давления.

Одновременно рост относительной скорости обтекания при n = 300 об/мин может повысить коэффициент массоотдачи до ~2 раз, что прежде всего сокращает период постоянной скорости сушки и выравнивает влажность частиц за счёт их непрерывного перемещения. Следовательно, сокращение общей продолжительности сушки зависит от доли свободной влаги в материале и должно быть меньше отношения β/β_0, что качественно согласуется с литературными данными о сокращении продолжительности процесса на 20–40 % [5, 7].

С учётом изложенного для описания кинетики конвективно-центробежной сушки предлагается модель Пейджа [11, 14], в которой константа скорости сушки является функцией центробежного фактора:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \exp\left(-k\tau^N\right), \qquad k = k_0\,(1 + A \bullet Fr^m) \tag{6}$$

где k_0 – константа скорости сушки при традиционной конвективной сушке (Fr = 0), мин$^{-N}$; N – эмпирический показатель; A, m – эмпирические коэффициенты, определяемые по результатам опытов при различных частотах вращения; τ – продолжительность сушки, мин.

По литературным данным [5, 7], использование центробежного воздействия позволяет сократить продолжительность сушки на 20–40 % по сравнению с традиционными конвективными системами. Для подтверждения этих данных применительно к рассматриваемой установке необходимы собственные экспериментальные исследования по методике, изложенной выше.

Выводы

Проведённый анализ показывает, что применение центробежной силы является эффективным способом совершенствования технологии конвективной сушки овощей. Дополнительное механическое воздействие способствует ускорению внутреннего влагопереноса и повышению интенсивности испарения влаги.

По литературным данным [5, 7], комбинированная конвективно-центробежная сушка обеспечивает сокращение продолжительности процесса до 40 %, снижение энергозатрат до 35 % и улучшение качественных характеристик готового продукта. Получено условие (4) механического удаления влаги из капилляров материала в центробежном поле. Расчёт показывает, что при радиусе вращения 0,25 м и частоте 300 об/мин (Fr ≈ 25) центробежное давление (≈2,5 кПа) превышает капиллярное лишь для пор радиусом более ≈53 мкм. Следовательно, центробежное воздействие интенсифицирует главным образом удаление свободной влаги и внешний тепло- и массообмен (рост коэффициента массоотдачи до ~2 раз), тогда как удаление связанной влаги в периоде падающей скорости сушки центробежным полем практически не ускоряется. Для количественного описания процесса предложена модель кинетики (6), в которой константа скорости сушки является функцией центробежного фактора. Наиболее перспективными направлениями дальнейших исследований являются разработка энергоэффективных сушильных установок, математическое моделирование и внедрение интеллектуальных систем управления.

Таким образом, использование центробежной силы открывает новые возможности для модернизации сушильных технологий в пищевой промышленности и позволяет повысить конкурентоспособность предприятий по переработке овощной продукции.

Список литературы

1. Алибаш А. Исследование процессов сушки пищевых материалов. – Анкара, 2012. – 640–647 С.
2. ГОСТ 28561-90. Продукты переработки плодов и овощей. Методы определения сухих веществ или влаги. – М.: Изд-во стандартов, 1990.
3. S. Darıcı, S. Şen. Darıcı, S. Experimental investigation of convective drying kinetics of kiwi under different conditions // Heat and Mass Transfer. – 2015. – Т. 51, № 8. – P. 1167–1176. – DOI: 10.1007/s00231-014-1487-x.
4. Доймаз И. Doymaz İ. Convective air drying characteristics of thin layer carrots // Journal of Food Engineering. – 2004. – Т. 61, № 3. – P. 359–364.

5. Калин-Санчес А. и др. Сравнение традиционных и современных методов сушки пищевого сырья // Foods. – 2020. – Т. 9, № 9.
6. Лыков А.В. Теория сушки. – 2-е изд. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.
7. Машков Ю.К., Семёнов Г.В. Энергосберегающие технологии сушки растительного сырья // Пищевая промышленность. – 2018. – № 6. – С. 24–29.
8. Рогов И.А., Забашта А.Г. Тепло- и массообменные процессы пищевых производств. – М.: КолосС, 2004. – 543 с.
9. Ю.В. Родионов, Д.В. Никитин, О.А. Зорина. Вакуумные технологии производства порошков и экстрактов из овощей, плодов и ягод для функциональных продуктов питания // Наука в Центральной России. – 2023. – Т. 61, № 1. – С. 55–65. – DOI: 10.35887/2305-2538-2023-1-55-65.
10. Crank J. The Mathematics of Diffusion. – 2nd ed. – Oxford: Clarendon Press, 1975. – 414 P.
11. Erbay Z., Icier F. A review of thin layer drying of foods: theory, modeling, and experimental results // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. – 2010. – Т. 50, № 5. – P. 441–464.
12. Ergasheva Z., Xalmuhamedova Sh., Sultanova Sh., Safarov J. Innovative methods of processing liquid food media. AGRITECH-X 2024. E3S Web of Conf. 548, 02022. 2024. [Электронный ресурс]. – P. 1–5. URL: https://doi.org/ (дата обращения: 24.06.2026).
13. Morad, M.M. Thermal analysis and performance evaluation of a solar tunnel greenhouse dryer for drying peppermint plants / M.M. Morad, M.A. El-Shazly, K.I. Wasfy, H.A. M. El-Maghawry // Renewable Energy. – 2017. – T. 101. – P. 992–1004. – DOI: 10.1016/j.renene. 2016.09.042.
14. Onwude D.I., Hashim N., Janius R.B., Nawi N.M., Abdan K. Modeling the thin-layer drying of fruits and vegetables: a review // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. – 2016. – T. 15, № 3. – P. 599–618.
15. Skåra T., Løvdal T., Skipnes D., Mehlomakulu N.N., Mapengo C.R., Baah R.O., Emmambux M.N. Drying of vegetable and root crops by solar, infrared, microwave, and radio frequency as energy efficient methods: a review // Food Reviews International. – 2023. – T. 39, № 9. – P. 7197–7217. – DOI: 10.1080/87559129.2022.2148688.

References

1. Alibash A. [Study of drying processes of food materials]. – Ankara, 2012.- 640–647 S (In Russ.).
2. GOST 28561-90. [Products of fruit and vegetable processing. Methods for determination of dry matter or moisture]. – M.: Izd-vo standartov, 1990 (In Russ.).
3. Darıcı S., Şen S. [Drying kinetics of vegetables under convective conditions] // Food Engineering Journal. – 2012. (In Russ.).
4. [Doymaz İ. Convective air drying characteristics of thin layer carrots] // Journal of Food Engineering. – 2004. – Vol. 61, No. 3. – P. 359–364. (In Russ.).
5. [Comparison of traditional and modern methods of drying food raw materials] // Foods. – 2020. – Vol. 9, No. 9. (In Russ.).

6. Lykov A.V. [Theory of drying]. – 2-e izd. – M.: Energiya, 1968. – 472 s (In Russ.).
7. Mashkov Yu.K., Semyonov G.V. [Energy-saving technologies for drying plant raw materials] // Pishchevaya promyshlennost'. – 2018. – No. 6. (In Russ.).
8. Rogov I.A., Zabashta A.G. [Heat and mass transfer processes in food production]. – M.: KolosS, 2004. – 543 s (In Russ.).
9. [Vacuum technologies for the production of powders and extracts from vegetables, fruits, and berries for functional food products] // Nauka v tsentral'noj Rossii. – 2023. (In Russ.).
10. Crank J. The Mathematics of Diffusion. – 2nd ed. – Oxford: Clarendon Press, 1975. – 414 P.
11. Erbay Z., Icier F. A review of thin layer drying of foods: theory, modeling, and experimental results // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. – 2010. – Vol. 50, No. 5. – P. 441–464.
12. Ergasheva Z., Xalmuhamedova Sh., Sultanova Sh., Safarov J. Innovative methods of processing liquid food media. AGRITECH-X 2024. E3S Web of Conf. 548, 02022. 2024 [Электронный ресурс]. – P. 1–5. – URL: https://doi.org/ (accessed: 24.06.2026).
13. Morad M. et al. Convective drying analysis of vegetable products // Journal of Food Processing. – 2017.
14. Onwude D.I., Hashim N., Janius R.B., Nawi N.M., Abdan K. Modeling the thin-layer drying of fruits and vegetables: a review // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. – 2016. – Vol. 15, No. 3. – P. 599–618.
15. Skåra T., Løvdal T., Skipnes D., Mehlomakulu N.N., Mapengo C.R., Baah R.O., Emmambux M.N. Drying of vegetable and root crops by solar, infrared, microwave, and radio frequency as energy efficient methods: a review // Food Reviews International. – 2023. – Vol. 39, No. 9. – P. 7197–7217. – DOI: 10.1080/87559129.2022.2148688.

Статья поступила в редакцию: 30.09.2026
Статья принята к публикации: 12.10.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 664.8.047:635.62

Низкотемпературное осмотико-термическое вскрытие оболочки семян тыквы: обоснование режима методами дисперсионного анализа и поверхности отклика

Хаитов Рауф Арифович
канд. техн. наук, доц.
Бухарский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Бухара
Ёкубов Мухриддин Эркин угли
соискатель
Бухарский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Бухара
E-mail: muxriddinyoqubov932g@gmail.com
Рахмонов Кахрамон Санокулович
канд. техн. наук, доц.
Бухарский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Бухара
Ахмедова Мехринисо Бахромовна
PhD, доц.
Бухарский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Бухара

Low-temperature osmotic-thermal hull opening of pumpkin seeds: justification of the regime by analysis of variance and response surface methodology

Khaitov Rauf
candidate of Technical Sciences
Dotsent, Bukhara State Technical University
Uzbekistan, Bukhara
Yakubov Mukhriddin
Researcher
Bukhara State Technical University
Uzbekistan, Bukhara
Rakhmonov Kakhramon
candidate of Technical Sciences
Dotsent, Bukhara State Technical University
Uzbekistan, Bukhara
Akhmedova Mexriniso
docent Bukhara State Technical University
Uzbekistan, Bukhara

Библиографическое описание: Низкотемпературное осмотико-термическое вскрытие оболочки семян тыквы: обоснование режима методами дисперсионного анализа и поверхности отклика // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Хаитов Р.А. [и др.]. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23774

Аннотация

Промышленная переработка семян тыквы включает сушку при 50–80 °C и обжарку при 160–180 °C, что разрушает термолабильные биологически активные вещества. В работе дано количественное статистическое обоснование параметров первого варианта ранее запатентованного способа UZ IAP 07182, в котором надрез оболочки, замачивание в растворе и умеренный нагрев вызывают её растрескивание уже при 38–40 °C. Эксперимент поставлен по полному факторному плану 5 × 4 × 2: температура 30–50 °C, концентрация раствора 5–20 %, растворённое вещество – NaCl или сахар; откликом служила доля семян с трещинами в пробе из 100 шт. Данные обработаны двух- и трёхфакторным дисперсионным анализом и квадратичными моделями поверхности отклика, кинетика окончательной сушки оценена по диффузионной модели Фика. Главным фактором оказалась температура (F = 24,0 для NaCl и 40,5 для сахара, $p < 0{,}001$), вторым – концентрация (F = 8,9 и 38,9). При температуре от 40 °C и концентрации от 10 % отклик выходит на плато 91–93 %. Модели адекватны (R^2 = 0,917 и 0,933, CV ≤ 3,5 %). В режиме 40 °C и 10 % получено 91,6 % (NaCl) и 93,0 % (сахар) вскрытых семян, различие незначимо (p = 0,92). Сушка при 40 °C и 2,55 м/с до влажности 5–6 % сохранила 91,6 % семян с трещинами. Режим 40 °C / 10 % – точка плато с минимальными температурой и концентрацией; она совпадает с режимом, заявленным в патенте. Каждое условие представлено одной пробой из 100 семян, поэтому статистические выводы носят предварительный характер.

Abstract

Industrial processing of pumpkin seeds involves drying at 50–80 °C and roasting at 160–180 °C, which degrades heat-sensitive bioactive compounds. This study statistically justifies the parameters of the first variant of the previously patented method UZ IAP 07182, in which notching the hull, soaking in a solution and mild heating cause hull cracking at 38–40 °C. A full 5 × 4 × 2 factorial design was used: temperature 30–50 °C, solution concentration 5–20 %, solute NaCl or sucrose; the response was the share of cracked seeds in a sample of 100. The data were processed by two- and three-way analysis of variance and quadratic response surface models; final drying kinetics was estimated with Fick's diffusion model. Temperature was the dominant factor (F = 24.0 for NaCl and 40.5 for sucrose, $p < 0.001$), followed by concentration (F = 8.9 and 38.9). At 40 °C and above and 10 % and above, the response reached a plateau of 91–93 %. The models were adequate (R^2 = 0.917 and 0.933, CV ≤ 3.5 %). At 40 °C and 10 %, 91.6 % (NaCl) and 93.0 % (sucrose) of seeds were cracked, with no significant difference (p = 0.92). Drying at 40 °C and 2.55 m/s to 5–6 % moisture preserved 91.6 % of cracked seeds. The 40 °C / 10 % regime, the lowest-temperature and lowest-concentration point of the plateau, coincides with the patented one. With one 100-seed sample per condition, the conclusions are preliminary.

Ключевые слова: семена тыквы, вскрытие оболочки, осмотическое замачивание, гелиоконвективная сушка, дисперсионный анализ, поверхность отклика, диффузия влаги.

Keywords: pumpkin seeds, hull opening, osmotic soaking, solar-convective drying, analysis of variance, response surface, moisture diffusion.

Введение

Семена тыквы содержат около 27–31 % белка и 44–52 % липидов с высокой долей ненасыщенных жирных кислот, а также фитостерины, токоферолы, каротиноиды, цинк и магний; ядро традиционно применяют как глистогонное средство и для профилактики заболеваний предстательной железы [7]. Качество продукта определяют сушка и удаление одревесневшей оболочки, но совместно эти операции практически не оптимизируют.

Сушка семян тыквы изучена при 25–80 °C в конвективных, солнечных, кипящем и виброкипящем слое, рефрактанс- и термосифонных сушилках [4; 6; 10–13], причём значения коэффициента диффузии сильно расходятся даже для одного вида [8]. В патентных способах семена вместе с оболочкой сушат при 50–80 °C и обжаривают при 160–180 °C [2; 3], что разрушает часть витаминов и белков.

В способе UZ IAP 07182 [1] все тепловые операции ограничены 38–40 °C. По первому варианту острый конец оболочки надрезают на 2–3 мм, семена замачивают в 10 %-ном растворе NaCl или сахара и быстро нагревают; возникающее внутреннее давление раскрывает оболочку перед окончательной гелиоконвективной сушкой.

Способ и режим (38–40 °C, 10 %-ный раствор) защищены патентом [1], однако количественное влияние параметров процесса на вскрытие оболочки не опубликовано. Новизна настоящей работы состоит не в способе и не в самом режиме, а в статистической оценке влияния температуры, концентрации и вида раствора в более широкой области (30–50 °C, 5–20 %) и в количественном обосновании ранее запатентованного режима. Цель работы – статистически обосновать режим: оценить влияние температуры, концентрации и вида раствора на растрескивание оболочки, построить модели поверхности отклика, сравнить режимы окончательной сушки и рассчитать её продолжительность.

Материалы и методы

Сырьё и схема обработки. Использовали семена тыквы (Cucurbita sp.), выделенные из зрелых плодов, выращенных в Бухарской области. Промытые семена подсушивали в гелиоконвективной сушилке при 38–40 °C до влажности 12–14 % (влажность определяли высушиванием при 105 °C до постоянной массы по ГОСТ 10856-96), надрезали, замачивали и нагревали, как описано выше, затем досушивали при 38–40 °C до 5–6 % и упаковывали под вакуумом. Раствор через надрез вызывает набухание ядра, нагрев повышает давление пара под оболочкой, и разность давлений раскрывает её.

План эксперимента. Применён полный факторный план 5 × 4 × 2 (40 опытов): температура замачивания и нагрева T = 30; 35; 40; 45; 50 °C, концентрация раствора C = 5; 10; 15; 20 %, вид растворённого вещества S – NaCl или сахар. Для регрессионного анализа факторы кодировали: $x_1 = (T - 40)/10$, $x_2 = (C - 12{,}5)/7{,}5$. В каждом опыте после нагрева в пробе из N_0 = 100 семян (одна проба на каждое условие, т. е. одна повторность опыта) подсчитывали число семян с видимыми трещинами $N_т$ и находили степень растрескивания

$$Y = 100 \cdot N_т / N_0, \ \%. \qquad (1)$$

Поскольку Y – биномиальная доля, 95 %-ные доверительные интервалы рассчитывали по методу Уилсона [15]. Следует подчеркнуть, что 100 семян одной пробы – это единицы наблюдения внутри одного опыта, а не 100 независимых технологических повторностей: интервал Уилсона характеризует только выборочную неопределённость доли в пробе и не учитывает вариабельность между партиями сырья и повторными обработками. Независимые повторности опыта не проводились, поэтому в дисперсионном анализе единицей наблюдения служило одно значение Y для каждого сочетания факторов. Режимы окончательной сушки сравнивали в пяти сочетаниях конечной влажности (3–8 %), температуры (30–50 °C) и скорости воздуха (1,35–3,75 м/с). Опыты проводили на лабораторной гелиоконвективной сушилке при загрузке семян в один слой; температуру воздуха контролировали термометром, скорость воздуха – анемометром, массу проб – на лабораторных весах. Каждый режим представлен одной пробой из 100 семян; поскольку параметры в этих опытах изменялись одновременно, они характеризуют режимы в целом, а не влияние отдельных факторов.

Моделирование и статистика. Зависимость Y от x_1 и x_2 для каждого раствора описывали полиномом второго порядка [9]:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2. \quad (2)$$

Адекватность оценивали по R^2, R^2_{adj}, RMSE, CV и критерию Фишера. Для каждого раствора выполнен двухфакторный дисперсионный анализ без повторностей, в котором взаимодействие $T \times C$ служило остаточной дисперсией; аддитивность проверяли критерием Тьюки [14]. Влияние вида раствора оценивали трёхфакторным анализом (ошибка – тройное взаимодействие), парным t-критерием, критерием Уилкоксона и χ^2 ($p < 0{,}05$). Расчёты выполнены в Python 3 (statsmodels, SciPy).

Продолжительность окончательной сушки оценивали по решению второго закона Фика для пластины полутолщиной L [5] с аррениусовской зависимостью коэффициента диффузии:

$$\mathrm{MR} = (8/\pi^2)\cdot\Sigma\,(2n+1)^{-2}\cdot\exp[-(2n+1)^2\pi^2 D_{эф}t/(4L^2)],\ D_{эф} = D_0\cdot\exp[-E_a/(RT)]. \quad (3)$$

Коэффициент диффузии в работе не измеряли, поэтому приняты литературные значения для семян тыквы: $D_{эф} = 8{,}53\cdot10^{-11}$ м^2/с при 40 °C и $E_a = 33{,}15$ кДж/моль [12] ($D_0 = 2{,}89\cdot10^{-5}$ м^2/с), $L = 1{,}5$ мм [4; 11]; учитывали 30 членов ряда. Расчёт носит прогнозный характер.

Результаты и обсуждение

Влияние температуры и концентрации.

При повышении температуры от 30 до 40 °C степень растрескивания заметно возрастала: при концентрации 10 % – с 74 до 91,6 % для NaCl и с 70 до 93 % для сахара (рис. 1). Выше 40 °C рост прекращался: значения при 45 и 50 °C (91,4–91,6 % для NaCl и 92–93 % для сахара при $C \geq 10$ %) лежат внутри доверительных интервалов для 40 °C (84,5–95,6 % и 86,3–96,6 %). При 5 % отклик оставался низким при любой температуре (68–89 и 64–80 %) из-за слабого набухания.

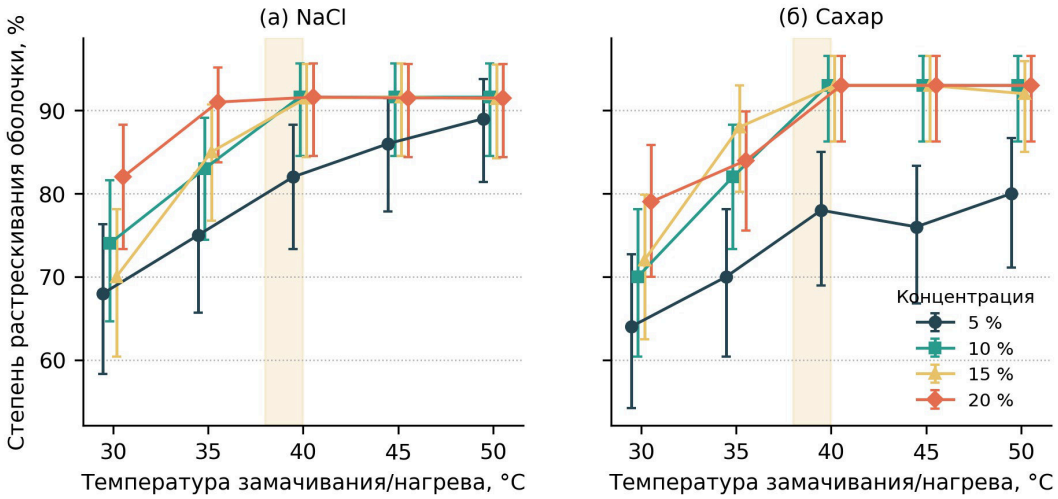


Рисунок 1. Влияние температуры замачивания и нагрева на степень растрескивания оболочки при разных концентрациях раствора: а – NaCl; б – сахар (планки – 95 %-ные интервалы Уилсона, n = 100; заливка – диапазон 38–40 °C по патенту [1])

Это согласуется с ростом давления насыщенного пара воды с 4,23 до 7,36 кПа (в 1,74 раза) при нагреве от 30 до 40 °C. Причины, по которым у оставшихся ≈ 8 % семян оболочка не растрескалась, в данной работе не исследовались.

Дисперсионный анализ.

Температура и концентрация значимо влияют на отклик для обоих растворов (табл. 1). На температуру приходится 71 % (NaCl) и 56 % (сахар) общей вариации, на концентрацию – 20 и 40 %. Критерий Тьюки неаддитивности не выявил (p = 0,096 и 0,270).

Таблица 1. Результаты дисперсионного анализа степени растрескивания оболочки

Источник	**df**	***F* (NaCl)**	***p* (NaCl)**	***F* (сахар)**	***p* (сахар)**	***F* (3 ф.)**	***p* (3 ф.)**
Температура *T*	4	24,00	< 0,001	40,47	< 0,001	109,81	< 0,001
Концентрация *C*	3	8,91	0,002	38,91	< 0,001	69,11	< 0,001
Вид раствора *S*	1	–	–	–	–	5,31	0,040
T × *C*	12	ошибка	–	ошибка	–	2,58	0,057
T × *S*	4	–	–	–	–	0,48	0,748
C × *S*	3	–	–	–	–	7,17	0,005

Примечание: «3 ф.» – трёхфакторная модель, ошибка – взаимодействие T × C × S (df = 12, MS = 4,21); в двухфакторных моделях MS ошибки 8,84 (NaCl) и 6,23 (сахар).

В трёхфакторной модели главный эффект вида раствора находится на границе значимости (p = 0,040), а взаимодействие $C \times S$ значимо (p = 0,005): сахар даёт меньший отклик при 5 % и несколько больший при $C \geq 10$ %. По всем 20 сочетаниям *T*–*C* растворы не различаются (средние 85,4 и 84,0 %; t = 1,69, p = 0,108; критерий Уилкоксона p = 0,286), а в режиме патента различие 91,6 и 93,0 % незначимо (χ^2 = 0,01, p = 0,92). Выбор раствора, таким образом, определяется назначением продукта.

Модели поверхности отклика.

Коэффициенты моделей (2) приведены в таблице 2. Обе модели значимы (F = 31,1 и 38,8, $p < 10^{-6}$) и объясняют 91,7 и 93,3 % вариации. Отрицательный квадратичный член температуры отражает насыщение отклика выше 40 °C. Для NaCl значимо взаимодействие

x_1x_2 (p = 0,024): при низкой температуре более концентрированный раствор частично компенсирует слабый нагрев. Для сахара значим квадратичный член концентрации, что указывает на оптимум около 15 %.

Таблица 2. Коэффициенты моделей (2) (± стандартная ошибка) и показатели адекватности

Член	NaCl	*p*	Сахар	*p*
b_0	89,63 ± 1,19	< 0,001	91,46 ± 1,32	< 0,001
b_1 (x_1)	8,29 ± 0,84	< 0,001	8,85 ± 0,93	< 0,001
b_2 (x_2)	4,21 ± 0,80	< 0,001	6,87 ± 0,88	< 0,001
b_{12} (x_1x_2)	−2,85 ± 1,13	0,024	−0,45 ± 1,25	0,724
b_{11} (x_1^2)	−6,65 ± 1,42	< 0,001	−7,64 ± 1,58	< 0,001
b_{22} (x_2^2)	−1,54 ± 1,33	0,268	−6,64 ± 1,48	< 0,001
R^2 / R^2_{adj}	0,917 / 0,888	–	0,933 / 0,909	–
RMSE / CV, %	2,65 / 3,1	–	2,95 / 3,5	–
F (5; 14)	31,06	< 0,001	38,82	< 0,001

Выбор режима замачивания.

Математические максимумы моделей находятся при 44,1 °C и 19,9 % (93,4 %) для NaCl и при 45,6 °C и 16,2 % (95,7 %) для сахара. Однако они превышают опытное плато лишь на 2–3 п. п., что меньше биномиальной неопределённости пробы (≈ ± 5 %). Поэтому в качестве практического принят режим с минимальными температурой и концентрацией в пределах установленного плато: дальнейшее их повышение не даёт статистически различимого прироста отклика, но увеличивает тепловую нагрузку на продукт и расход реагента. Энергозатраты в работе не измерялись, поэтому сравнение режимов по энергопотреблению не проводится. Для обоих растворов такой точкой является 40 °C и 10 % (91,6 и 93,0 %). Этот режим совпадает с заявленным в патенте [1] (38–40 °C, 10 %-ный раствор): настоящая работа не устанавливает его впервые, а даёт ему количественное статистическое обоснование в исследованной области факторов.

Окончательная сушка.

Наибольшая доля семян с трещинами сохранилась при сушке при 40 °C и 2,55 м/с до влажности 5–6 % (табл. 3). Наименьшее значение (58 %) получено в режиме 30 °C и 1,35 м/с с досушиванием до 3–4 %. Режимы 45–50 °C дали близкие к оптимальному результаты (89–91 %), однако конечная влажность в них составила 6–8 %, что выше допустимой для хранения. Поскольку конечная влажность, температура и скорость воздуха в этих опытах изменялись одновременно, установить, какой из параметров обусловил различия, по имеющимся данным нельзя: табл. 3 позволяет сравнивать лишь режимы в целом, а для разделения эффектов отдельных факторов требуется факторный эксперимент.

Таблица 3. Влияние режима окончательной сушки на степень растрескивания оболочки

Конечная влажность, %	Температура воздуха, °C	Скорость воздуха, м/с	Степень растрескивания, %	95 %-ный ДИ Уилсона, %
3–4	30	1,35	58,0	48,2–67,2

Конечная влажность, %	Температура воздуха, °C	Скорость воздуха, м/с	Степень растрескивания, %	95 %-ный ДИ Уилсона, %
4–5	35	1,70	84,0	75,6–89,9
5–6	40	2,55	91,6	84,5–95,6
6–7	45	3,40	89,0	81,4–93,7
7–8	50	3,75	91,0	83,8–95,2

Расчёт по (3) даёт $D_{эф} = 5{,}61 \cdot 10^{-11}$ м^2/с при 30 °C, $8{,}53 \cdot 10^{-11}$ при 40 °C и $12{,}65 \cdot 10^{-11}$ м^2/с при 50 °C. Время снижения влагосодержания до MR = 0,1 составляет 9,5; 6,2; 4,2 и 2,9 ч при 30, 40, 50 и 60 °C соответственно. Низкотемпературный режим удлиняет сушку в 1,5–2 раза по сравнению с 50–60 °C, однако температура продукта при этом не превышает 40 °C, тогда как в известных способах она достигает 60–80 °C [2; 3]. Полученные значения близки к 4–5 ч, установленным при вынужденной конвекции при 40–46 °C [4].

Ограничения работы. Каждое экспериментальное условие представлено одной пробой из 100 семян; независимые повторности опыта (с разными партиями сырья и повторной обработкой) не проводились. Поэтому оценки значимости в табл. 1 и 2 получены при допущении об отсутствии существенной вариации между повторностями, а интервалы Уилсона отражают только выборочную неопределённость внутри пробы. Представленные статистические выводы следует рассматривать как предварительные; для их подтверждения необходимы независимые повторные опыты ($n \geq 3$). Кинетика окончательной сушки получена расчётом по литературным значениям коэффициента диффузии. Толщина и прочность оболочки, а также содержание биологически активных веществ (токоферолов, жирнокислотный состав) в данной работе не определялись; их изучение – задача дальнейших исследований.

Заключение

Степень растрескивания оболочки надрезанных семян тыквы определяется прежде всего температурой замачивания и нагрева ($F = 24{,}0–40{,}5$, $p < 0{,}001$) и во вторую очередь концентрацией раствора ($F = 8{,}9–38{,}9$, $p \leq 0{,}002$). При температуре от 40 °C и концентрации от 10 % отклик выходит на плато 91–93 %, растворы NaCl и сахара в режиме патента статистически равноценны. Квадратичные модели ($R^2 = 0{,}917–0{,}933$, CV < 4 %) пригодны для управления процессом при 30–50 °C и 5–20 %. Режим 40 °C / 10 % с последующей сушкой при 38–40 °C до влажности 5–6 % – точка плато с минимальными температурой и концентрацией. Полученные результаты статистически подтверждают ранее запатентованный режим первого варианта способа UZ IAP 07182 [1], позволяющий получать семена со вскрытой оболочкой без нагрева выше 40 °C. Поскольку каждое условие представлено одной пробой, выводы носят предварительный характер и требуют подтверждения в независимых повторных опытах.

Список литературы

1. Способ получения семян тыквы со вскрытой оболочкой для пищевой промышленности и медицины: пат. № IAP 07182 Респ. Узбекистан: заявл. 19.02.2018: опубл. 2022 / С. Астанов, М.Р. Турдиев, М.Э. Ёкубов, Г.К. Касимова.
2. Способ получения масла из семян тыквы с повышенным содержанием биологически активных веществ: пат. № 2170027 Рос. Федерация: МПК A23L 1/30, A23D 9/02, A61K 131/00, A61K 36/42, C11B 1/04: № 2000110958/13: заявл. 28.04.2000: опубл. 10.07.2001 / И.Ф. Горлов, Т.В. Каренгина, В.И. Беляев; заявитель и патентообладатель ГУ Волгогр. науч.-исслед. технол. ин-т мясомолочного скотоводства и переработки продукции животноводства РАСХН.
3. Способ получения муки из семян тыквенных культур: пат. № 2286678 Рос. Федерация: МПК A23J 1/14, A23L 1/212: № 2005113405/13: заявл. 03.05.2005: опубл. 10.11.2006, Бюл. № 31 / И.М. Осадченко, И.Ф. Горлов, Д.А. Скачков, М.И. Сложенкина; заявитель и патентообладатель ГУ ВНИТИ ММС и ППЖ Россельхозакадемии.
4. Can A. An analytical method for determining the temperature dependent moisture diffusivities of pumpkin seeds during drying process // Applied Thermal Engineering. – 2007. – Т. 27. – P. 682–687. – DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2006.04.030.
5. Crank J. The Mathematics of Diffusion. – 2nd ed. – Oxford: Clarendon Press, 1975. – 414 P.
6. Dhurve P., Tarafdar A., Arora V.K. Vibro-fluidized bed drying of pumpkin seeds: assessment of mathematical and artificial neural network models for drying kinetics // Journal of Food Quality. – 2021. – Т. 2021. – Art. 7739732. – DOI: 10.1155/2021/7739732.
7. Dotto J.M., Chacha J.S. The potential of pumpkin seeds as a functional food ingredient: a review // Scientific African. – 2020. – Т. 10. – DOI: 10.1016/j.sciaf.2020.e00575.
8. Mkhize X., Nkosi N., Zondi L., Tumba K. Convective drying of pumpkin: brief literature review and new data for organically produced indigenous pumpkin (Cucurbita pepo L.) over an expanded temperature range // Journal of Agriculture and Food Research. – 2023. – Т. 14. – Art. 100800. – DOI: 10.1016/j.jafr.2023.100800.
9. Montgomery D.C. Design and Analysis of Experiments. – 9th ed. – Hoboken: Wiley, 2017. – 734 P.
10. Mujaffar S., Ramsumair S. Fluidized bed drying of pumpkin (Cucurbita sp.) seeds // Foods. – 2019. – Т. 8, № 5. – Art. 147. – DOI: 10.3390/foods8050147.
11. Ortiz-Jerez M.J., Franco Sánchez A., Zapata Montoya J.E. Drying kinetics and sensory characteristics of dehydrated pumpkin seeds (Cucurbita moschata) obtained by refractance window drying // Heliyon. – 2022. – Т. 8, № 10. – DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e10947.
12. Sacilik K. Effect of drying methods on thin-layer drying characteristics of hull-less seed pumpkin (Cucurbita pepo L.) // Journal of Food Engineering. – 2007. – Т. 79, № 1. – P. 23–30. – DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2006.01.023.
13. Sultanova Sh.A., Imanova G.T., Safarov J.E., Usenov A.B., Ait-Kaddour A., Azimov A.T. Mathematical modelling of pumpkin seed drying in a rotary thermosyphon dryer // Materials Research Innovations. – 2024. – DOI: 10.1080/14328917.2024.2366581.

14. Tukey J.W. One degree of freedom for non-additivity // Biometrics. – 1949. – T. 5, № 3. – P. 232–242.
15. Wilson E.B. Probable inference, the law of succession, and statistical inference // Journal of the American Statistical Association. – 1927. – T. 22, № 158. – P. 209–212.

References

1. Astanov S., Turdiyev M.R., Yëkubov M.E., Kasimova G.K. [Method for obtaining pumpkin seeds with an opened hull for the food industry and medicine]. Patent UZ IAP 07182, 2022. (In Uzbek).
2. Gorlov I.F., Karengina T.V., Belyayev V.I. [Method for producing pumpkin seed oil with an increased content of biologically active substances]. Patent RF 2170027, 2001. (In Russ.).
3. Osadchenko I.M., Gorlov I.F., Skachkov D.A., Slozhenkina M.I. [Method for producing flour from seeds of cucurbit crops]. Patent RF 2286678, 2005. (In Russ.).
4. Can A. An analytical method for determining the temperature dependent moisture diffusivities of pumpkin seeds during drying process // Applied Thermal Engineering. – 2007. – Vol. 27. – P. 682–687. – DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2006.04.030.
5. Crank J. The Mathematics of Diffusion. – 2nd ed. – Oxford: Clarendon Press, 1975. – 414 P.
6. Dhurve P., Tarafdar A., Arora V.K. Vibro-fluidized bed drying of pumpkin seeds: assessment of mathematical and artificial neural network models for drying kinetics // Journal of Food Quality. – 2021. – Vol. 2021. – Art. 7739732. – DOI: 10.1155/2021/7739732.
7. Dotto J.M., Chacha J.S. The potential of pumpkin seeds as a functional food ingredient: a review // Scientific African. – 2020. – Vol. 10. – DOI: 10.1016/j.sciaf.2020.e00575.
8. Mkhize X., Nkosi N., Zondi L., Tumba K. Convective drying of pumpkin: brief literature review and new data for organically produced indigenous pumpkin (Cucurbita pepo L.) over an expanded temperature range // Journal of Agriculture and Food Research. – 2023. – Vol. 14. – Art. 100800. – DOI: 10.1016/j.jafr.2023.100800.
9. Montgomery D.C. Design and Analysis of Experiments. – 9th ed. – Hoboken: Wiley, 2017.
10. Mujaffar S., Ramsumair S. Fluidized bed drying of pumpkin (Cucurbita sp.) seeds // Foods. – 2019. – Vol. 8, No. 5. – Art. 147. – DOI: 10.3390/foods8050147.
11. Ortiz-Jerez M.J., Franco Sánchez A., Zapata Montoya J.E. Drying kinetics and sensory characteristics of dehydrated pumpkin seeds (Cucurbita moschata) obtained by refractance window drying // Heliyon. – 2022. – Vol. 8, No. 10. – DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e10947.
12. Sacilik K. Effect of drying methods on thin-layer drying characteristics of hull-less seed pumpkin (Cucurbita pepo L.) // Journal of Food Engineering. – 2007. – Vol. 79, No. 1. – P. 23–30. – DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2006.01.023.
13. Sultanova Sh.A., Imanova G.T., Safarov J.E., Usenov A.B., Ait-Kaddour A., Azimov A.T. Mathematical modelling of pumpkin seed drying in a rotary thermosyphon dryer // Materials Research Innovations. – 2024. – DOI: 10.1080/14328917.2024.2366581.
14. Tukey J.W. One degree of freedom for non-additivity // Biometrics. – 1949. – Vol. 5, No. 3. – P. 232–242.

15. Wilson E.B. Probable inference, the law of succession, and statistical inference // Journal of the American Statistical Association. – 1927. – Vol. 22, No. 158. – P. 209–212.

Статья поступила в редакцию: 21.10.2026
Статья принята к публикации: 27.10.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 544.723:546.3

Физико-химические закономерности удаления ионов тяжёлых металлов из водных растворов с использованием природных адсорбентов

Хакимова Дилафруз Йулдашбой кизи
PhD, доц.
кафедры Горное дело, Янгиерский филиал Ташкентского химико-технологического института
Республика Узбекистан, г. Янгиер
Маматкулова Мохира Босимовна
PhD, доц.
кафедры химии, Алмалыкский государственный технический институт
Республика Узбекистан, г. Алмалык
E-mail: rasuljongdu@mail.ru
Азаматов Умид Зокирович
ст. преп. кафедры пищевых технологий
Гулистанский государственный университет
Республика Узбекистан, г. Гулистан
E-mail: umidazamatov03@gmail.com
Асомов Жавлон Хурсанович
ассистент
Гулистанский государственный университет
Республика Узбекистан, г. Гулистан
E-mail: javlonasomov011@gmail.com

Physicochemical patterns of heavy metal ion removal from aqueous solutions using natural adsorbents

Khakimova Dilafruz Yuldashboy kizi
PhD, Associate Professor
Department of Mining, Yangiyer Branch of the Tashkent Institute of Chemical Technology
Republic of Uzbekistan, Yangiyer
Mamatkulova Mohira Bosimovna
PhD, Associate Professor
Department of Chemistry, Almalyk State Technical Institute
Republic of Uzbekistan, Almalyk
Azamatov Umid Zokirovich
senior Lecturer
Department of Food Technologies, Gulistan State University
Republic of Uzbekistan, Gulistan

Библиографическое описание: Физико-химические закономерности удаления ионов тяжёлых металлов из водных растворов с использованием природных адсорбентов // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Хакимова Д.Й. кизи [и др.]. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23695

Asomov Javlon Khursanovich
Assistant
Gulistan State University
Republic of Uzbekistan, Gulistan

Аннотация

В данной статье разработана последовательность проверки физико-химических предпосылок удаления ионов тяжёлых металлов природными адсорбентами. Методическую основу составляют сопоставление научной литературы и техническая модификация шестилепестковой ромашки вопросов, соотнесённая с познавательными операциями таксономии Блума. В каждый сектор включены исследовательский вопрос, проверяемая величина и необходимый контроль. Рассмотрены влияние кислотности, состава раствора, массы сорбента, продолжительности контакта и присутствия конкурирующих ионов. Показано, что снижение концентрации металла в фильтрате не доказывает адсорбционный механизм, если не исключены осаждение и потери при разделении фаз. Получен алгоритм раздельного определения степени удаления и удельной сорбционной ёмкости. Приведён расчётный пример, демонстрирующий различие этих показателей; он не представляет экспериментальных сведений о конкретном месторождении или производстве. Обосновано применение нелинейного подбора изотерм с проверкой остатков и материального баланса. Сформулированы рекомендации по холостым опытам, регенерации и обращению с насыщенным сорбентом. Практическое значение разработки состоит в подготовке университетских исследований местного минерального и растительного сырья Узбекистана без преждевременного переноса результатов модельных растворов на промышленные стоки. Предлагаемая схема допускает дополнение аналитическим контролем при переходе к многокомпонентной водной среде.

Abstract

The study develops a verification sequence for the physicochemical assumptions underlying heavy metal ion removal by natural adsorbents. Its methodological basis combines comparative literature analysis with a technical adaptation of a six-petal question organiser related to Bloom’s cognitive operations. Each sector contains a research question, a measurable variable and a necessary control. Solution acidity, composition, adsorbent dose, contact time and competing ions are considered. A decrease in filtrate metal concentration does not establish adsorption unless precipitation and separation losses have been excluded. The resulting algorithm distinguishes removal efficiency from specific adsorption capacity. An illustrative calculation demonstrates this distinction and does not report experimental evidence for any particular deposit or enterprise. Nonlinear isotherm fitting is recommended together with residual analysis and mass-balance verification. Blank experiments, regeneration and management of spent adsorbents are discussed. The framework supports university investigations of local mineral and plant-derived materials in Uzbekistan while limiting premature extrapolation from model solutions to industrial effluents. Additional analytical controls are proposed for multicomponent aqueous systems.

Ключевые слова: адсорбция, тяжёлые металлы, природные сорбенты, изотермы, кислотность, ромашка Блума.

Keywords: adsorption, heavy metals, natural adsorbents, isotherms, acidity, Bloom question flower.

Введение

Природные сорбенты привлекают доступностью, однако их сравнение затрудняется различием исходных растворов и способов подготовки материала [1; 2; 10]. Особенно существенны кислотность и минеральные примеси: они способны изменить форму существования металла. Цель работы — построить схему исследования, которая связывает измеряемую степень очистки с проверкой механизма удаления.

Материалы и методы

Использован обзорно-методический анализ исследований адсорбционного равновесия и конкурентного связывания [3; 5; 9]. Ромашка Блума применена как организатор исследования, а не как химический метод. Её шесть секторов образуют вопросы о составе системы, достоверности измерения, причине эффекта, прогнозе, сопоставлении моделей и практическом решении. Связь с таксономией Блума [4] служит основанием для усложнения вопросов; шестилепестковая форма не приписывается автору таксономии.

К каждому сектору добавлены обязательные поля «показатель» и «контроль». Например, вопрос о влиянии pH требует определения остаточной концентрации и опыта без сорбента при той же кислотности. До подбора изотермы устанавливают время достижения равновесия и проверяют, не изменяет ли фильтр содержание металла. Модели Ленгмюра и Фрейндлиха сопоставляют по остаткам и содержательности параметров [6; 7; 8].

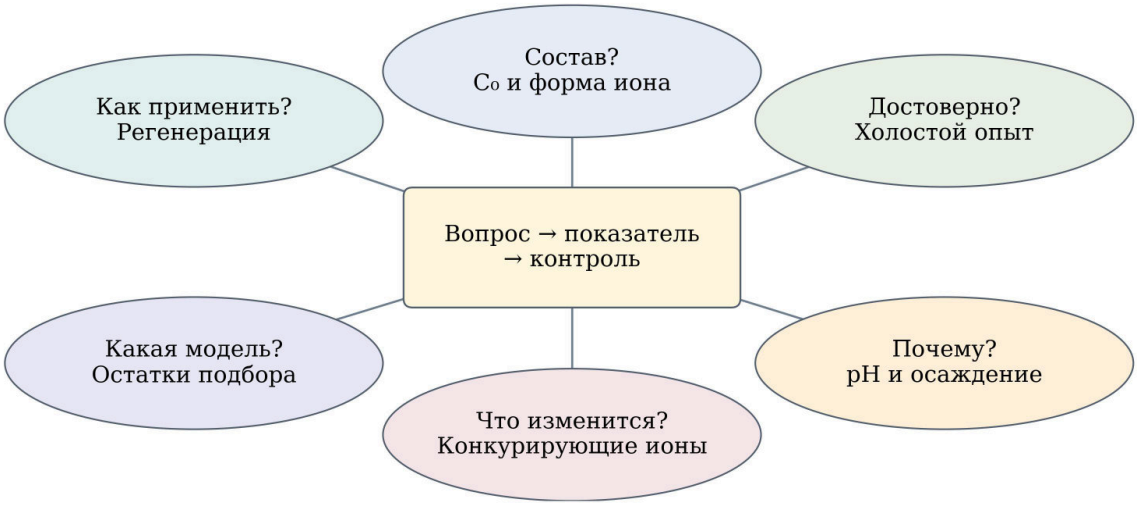


Рисунок 1. Ромашка исследовательских вопросов с техническим контуром контроля

Результаты и обсуждение

Степень удаления рассчитывают как $R = 100(C_0 - C_e)/C_0$, а равновесную ёмкость — $q_e = (C_0 - C_e)V/m$. Здесь концентрации выражены в мг/л, объём — в литрах, сухая масса — в граммах. При условных C_0 = 50 мг/л, C_e = 10 мг/л, V = 0,10 л и m = 0,50 г получаются R = 80 % и q_e = 8 мг/г. Это арифметический пример, не результат испытания природного материала.

Таблица 1. Условия, подлежащие раздельному контролю при адсорбционном опыте

Фактор	Измеряемая величина	Обязательный контроль
Кислотность	pH до и после контакта	Раствор без сорбента
Разделение фаз	Концентрация в фильтрате	Раствор через чистый фильтр
Количество сорбента	Ёмкость, мг/г	Масса сухого материала
Состав среды	Остаточные ионы	Одно- и многокомпонентная среда

Увеличение дозы нередко повышает долю удалённого металла, одновременно снижая нагрузку на единицу массы сорбента. Высокий процент очистки поэтому недостаточен для выбора технологии. Совпадение с псевдовторым порядком также не является самостоятельным доказательством хемосорбции [7]. Для природных цеолитов необходимо учитывать ионный обмен, состав обменных катионов и конкуренцию компонентов [9]. После регенерации оценивают не только возвращённую ёмкость, но и состав элюата.

Заключение

При исследовании местного сырья в вузах Узбекистана надлежит начинать с холостых опытов и материального баланса. Модифицированная ромашка связывает каждый вопрос с измерением и контролем. Переход к реальным стокам оправдан после проверки конкурирующих ионов, устойчивости материала и возможности обращения с отходами регенерации.

Список литературы

1. Фролов Ю.Г. Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы. – М.: Химия, 1982. – 400 с.
2. Bailey S.E., Olin T.J., Bricka R. et al. A review of potentially low-cost sorbents for heavy metals // Water Research. – 1999. – T. 33, № 11. – P. 2469–2479. – DOI: 10.1016/s0043-1354(98)00475-8.
3. Bayuo J., Rwiza M.J., Sillanpää M. et al. Removal of heavy metals from binary and multicomponent adsorption systems using various adsorbents – a systematic review // RSC Advances. – 2023. – T. 13, № 19. – P. 13052–13093. – DOI: 10.1039/d3ra01660a.
4. Bloom B.S. (ed.). Taxonomy of Educational Objectives. Handbook I: Cognitive Domain. – New York: David McKay, 1956.

5. Chen X., Hossain M.F., Duan C. et al. Isotherm models for adsorption of heavy metals from water – A review // Chemosphere. – 2022. – T. 307. – DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.135545.
6. Foo K., Hameed B. Insights into the modeling of adsorption isotherm systems // Chemical Engineering Journal. – 2010. – T. 156, № 1. – P. 2–10. – DOI: 10.1016/j.cej.2009.09.013.
7. Ho Y. McKay G. Pseudo-second order model for sorption processes // Process Biochemistry. – 1999. – T. 34, № 5. – P. 451–465. – DOI: 10.1016/s0032-9592(98)00112-5.
8. Langmuir I. THE ADSORPTION OF GASES ON PLANE SURFACES OF GLASS, MICA AND PLATINUM // Journal of the American Chemical Society. – 1918. – T. 40, № 9. – P. 1361–1403. – DOI: 10.1021/ja02242a004.
9. Velarde L., Nabavi M.S., Escalera E. et al. Adsorption of heavy metals on natural zeolites: A review // Chemosphere. – 2023. – T. 328. – DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.138508.
10. Wang J., Chen C. Biosorbents for heavy metals removal and their future // Biotechnology Advances. – 2009. – T. 27, № 2. – P. 195–226. – DOI: 10.1016/j.biotechadv.2008.11.002.

References

1. Frolov Yu.G. [Course in Colloid Chemistry. Surface Phenomena and Disperse Systems]. – M.: Khimiya, 1982. – 400 s (In Russ.).
2. Bailey S.E., Olin T.J., Bricka R. et al. A review of potentially low-cost sorbents for heavy metals // Water Research. – 1999. – Vol. 33, No. 11. – P. 2469–2479. – DOI: 10.1016/s0043-1354(98)00475-8.
3. Bayuo J., Rwiza M.J., Sillanpää M. et al. Removal of heavy metals from binary and multicomponent adsorption systems using various adsorbents – a systematic review // RSC Advances. – 2023. – Vol. 13, No. 19. – P. 13052–13093. – DOI: 10.1039/d3ra01660a.
4. Bloom B.S. (ed.). Taxonomy of Educational Objectives. Handbook I: Cognitive Domain. – New York: David McKay, 1956.
5. Chen X., Hossain M.F., Duan C. et al. Isotherm models for adsorption of heavy metals from water – A review // Chemosphere. – 2022. – Vol. 307. – DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.135545.
6. Foo K., Hameed B. Insights into the modeling of adsorption isotherm systems // Chemical Engineering Journal. – 2010. – Vol. 156, No. 1. – P. 2–10. – DOI: 10.1016/j.cej.2009.09.013.
7. Ho Y. McKay G. Pseudo-second order model for sorption processes // Process Biochemistry. – 1999. – Vol. 34, No. 5. – P. 451–465. – DOI: 10.1016/s0032-9592(98)00112-5.
8. Langmuir I. THE ADSORPTION OF GASES ON PLANE SURFACES OF GLASS, MICA AND PLATINUM // Journal of the American Chemical Society. – 1918. – Vol. 40, No. 9. – P. 1361–1403. – DOI: 10.1021/ja02242a004.
9. Velarde L., Nabavi M.S., Escalera E. et al. Adsorption of heavy metals on natural zeolites: A review // Chemosphere. – 2023. – Vol. 328. – DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.138508.
10. Wang J., Chen C. Biosorbents for heavy metals removal and their future // Biotechnology Advances. – 2009. – Vol. 27, No. 2. – P. 195–226. – DOI: 10.1016/j.biotechadv.2008.11.002.

Статья поступила в редакцию: 25.10.2026
Статья принята к публикации: 09.11.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 664.762:613.292

DOI: 10.32743/UniTech.2026.152.11.23692

Разработка поликомпонентной крупяной смеси с повышенным содержанием пищевых волокон для специализированного питания

Элмуродова Азима Сувон кизи
докторант
Бухарский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Бухара
E-mail: elmurodovaazima50@gmail.com

Development of a multicomponent cereal mixture enriched with dietary fibre for specialized nutrition

Elmurodova Azima Suvon qizi
Doctoral Student
Bukhara State Technical University
Uzbekistan, Bukhara

Аннотация

Цель работы — обосновать состав поликомпонентной крупяной смеси, сочетающей зерновые, бобовые и растительные функциональные ингредиенты, и оценить её пищевую и технологическую пригодность. На основе сравнительного анализа сырья были разработаны семь рецептурных вариантов; для перспективного состава рассмотрены показатели химического состава, поведения при варке и органолептической оценки. В качестве оптимального выделен вариант с гречихой и ячменём (65 %), чечевицей (18 %), семенами льна (5 %) и кунжута (5 %), морковным жмыхом (5 %), инулином (1,5 %) и корицей (0,5 %). Для данной смеси в исходных материалах приведены значения белка 14,2 г, пищевых волокон 15,9 г на 100 г сухого продукта, влажности 9,8 ± 0,3 %, времени варки 12–15 мин и потерь сухих веществ 4,1 ± 0,4 %. Расчётное значение гликемического индекса составило 36,8 ± 1,5. Сочетание компонентов позволяет формировать продукт с разнообразным нутриентным профилем при приемлемых технологических свойствах. Практическая значимость исследования связана с возможностью дальнейшей технологической отработки рецептуры и использования локально доступного растительного сырья. Для обоснования маркировки и рекомендаций по питанию необходимы независимая аналитическая проверка состава и исследования гликемического ответа готового продукта.

Библиографическое описание: Элмуродова А.С. кизи Разработка поликомпонентной крупяной смеси с повышенным содержанием пищевых волокон для специализированного питания // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23692

Abstract

The study aimed to substantiate the formulation of a multicomponent cereal mixture combining cereals, legumes and functional plant ingredients and to assess its nutritional and processing characteristics. Seven formulation variants were considered on the basis of a comparative raw-material assessment. The selected formula contained buckwheat and barley (65 %), lentils (18 %), flaxseed (5 %), sesame (5 %), carrot pomace (5 %), inulin (1,5 %) and cinnamon (0,5 %). According to the source material, the dry blend contained 14,2 g of protein and 15,9 g of dietary fibre per 100 g. Its moisture content was 9,8 ± 0,3 %, cooking time was 12–15 min, and dry matter losses during cooking were 4,1 ± 0,4 %. The reported estimated glycaemic index was 36,8 ± 1,5; nevertheless. Combining cereal and legume ingredients with fibre-rich plant materials offers a way to diversify the nutritional profile while retaining practical cooking characteristics. The main application prospect is further process development using plant raw materials available in the region. Analytical confirmation of composition, controlled assessment of postprandial glycaemic response, and shelf-life and safety studies are needed before health-related claims or specialized dietary recommendations can be justified. Thus, the proposed formulation should be regarded as a promising prototype rather than a clinically validated food for diabetes management.

Ключевые слова: поликомпонентная крупяная смесь, рецептура, гречиха, ячмень, чечевица, пищевые волокна, инулин, варочные свойства.

Keywords: multicomponent cereal blend, formulation, buckwheat, barley, lentils, dietary fibre, inulin, cooking properties.

Введение

При разработке крупяных продуктов для специализированного питания важен не отдельный ингредиент, а свойства готовой смеси после технологической обработки. Зерновые обеспечивают привычную структуру каши и энергетическую ценность, но содержание и доступность углеводов зависят от степени измельчения, термической обработки и сочетания с белками, липидами и пищевыми волокнами. Поэтому перспективным подходом считается сочетание различных групп растительного сырья, позволяющее регулировать состав без отказа от традиционного формата продукта [1, с. 185–194; 2, с. 7896–7913].

Гречиха и ячмень отличаются составом белков и полисахаридов; бобовые повышают долю растительного белка и дополняют аминокислотный профиль смеси. Семена льна и кунжута добавляют липиды и минорные биологически активные соединения, а инулин и овощной жмых расширяют спектр пищевых волокон. При этом увеличение количества волокон не всегда благоприятно для вкуса и консистенции: чрезмерная вязкость способна снижать потребительскую приемлемость [3, с. 188–205; 4, с. 2541–2547; 5, с. S1–S2].

Цель исследования - разработать и обосновать рецептуру поликомпонентной крупяной смеси, оценив соотношение нутриентных и основных технологических характеристик. Задачи включали сравнительный отбор сырья, формирование рецептурных моделей и определение показателей качества и пищевой ценности данной продукции.

Материалы и методы

Объектом исследования являлись семь рецептурных вариантов крупяной смеси на основе гречихи, ячменя, чечевицы, семян льна и кунжута, морковного жмыха, инулина и корицы. Сырьё подбирали с учётом содержания белка, пищевых волокон и липидов, а также ожидаемых свойств смеси после приготовления. Влажность определяли по ГОСТ 26312.7 – 88, содержание белка - методом Кьельдаля по ГОСТ 10846-91, жира - экстракционным методом по ГОСТ 29033-91, углеводов - расчётным методом по разности, пищевых волокон -ферментативно-гравиметрическим методом АОАС 991.43. Варочные свойства оценивали по продолжительности приготовления, коэффициенту разваривания и потерям сухих веществ в отвар. Органолептические характеристики вариантов оценивали по пятибалльной шкале.

Рецептурную оценку проводили сравнением модельных вариантов с учётом белковой и волоконной составляющих, прогнозируемого гликемического индекса (ГИ), органолептической характеристики и технологического поведения. Гликемический индекс модельных вариантов определяли расчётным методом (математическим моделированием) по значениям ГИ отдельных компонентов с учётом их массовой доли; полученные значения являются прогнозными. Достоверность различий между вариантами статистически не оценивалась.

Результаты и обсуждение

Сопоставление нескольких видов зернового сырья выявило преимущества гречихи по содержанию пищевых волокон и магния, а ячменя — по наличию β-глюканов. В сравнении с нутом чечевица характеризовалась более высоким содержанием белка (24,6 против 19,0 г/ 100 г сухого продукта). Такой набор сырья создаёт предпосылки для комплементарного сочетания зерновых и бобовых белков. Вместе с тем сведения о питательной ценности отдельных ингредиентов не могут автоматически переноситься на готовую кашу: доля компонента, температура и продолжительность приготовления изменяют конечные показатели [3, с. 188–205; 6, с. 104–109; 7, с. 185–198].

Для функциональной части рецептуры были выбраны семена льна и кунжута, морковный жмых, инулин и корица. Лён представляет интерес как источник альфа-линоленовой кислоты и слизистых полисахаридов, морковный жмых — как дополнительный источник пищевых волокон и каротиноидов. Инулин вводился для обогащения пребиотическими волокнами. Корица использовалась прежде всего как вкусоароматический компонент: данных представленной работы недостаточно, чтобы приписывать готовой крупе лечебное или инсулиноподобное действие [8, с. 532–545; 9, с. 837–847].

В рамках исследования разработаны семь рецептурных моделей ПДК, направленных на коррекцию ГИ и повышение нутрициологической ценности продукта для применения в диетическом питании лиц с нарушениями углеводного обмена, включая преддиабетические состояния и СД 2 типа (табл.1).

Таблица 1. Сравнительные характеристики семи рецептурных вариантов поликомпонентной крупы

Вариант	Состав основных компонентов	Доли групп, %*	Белок / волокна, г	ГИ / сенсорный балл
1 (контроль)	Гречиха, ячмень	70/30/0/0	10,5 / 6,2	52,0 / 4,5
2	Гречиха, ячмень, чечевица	75/25/0/0	13,2 / 8,5	48,0 / 4,6
3	Гречиха, чечевица, кунжут	75/20/5/0	13,5 / 7,8	49,0 / 4,7
4	Ячмень, чечевица, лён, кунжут, инулин, корица	65/25/5/5	14,0 / 11,5	42,0 / 4,3
5	Гречиха, ячмень, чечевица, лён, морковный жмых	70/20/5/5	12,8 / 12,0	44,0 / 4,4
6	Гречиха, ячмень, чечевица, лён, кунжут, повышенная доля инулина	65/25/5/10	14,1 / 15,5	38,0 / 3,8
7	Гречиха, ячмень, чечевица, лён, кунжут, морковный жмых, инулин, корица	65/18/10/7	14,2 / 15,9	36,8 / 4,8

** Доли групп указаны в последовательности: углеводно-зерновая основа / белковый компонент / масличный компонент / обогатительная добавка; сумма долей каждого варианта составляет 100 %.*

Контрольный вариант (вариант 1) включал только углеводно-зерновую основу – смесь гречки и ячменя, обеспечивающую базовый уровень пищевых волокон и низкий ГИ, что позволило использовать его как эталон для сравнения.

Вариант 2 был дополнен чечевицей как источником растительного белка с высоким содержанием лизина, компенсирующего дефицит аминокислот в зерновых, что способствовало повышению биологической ценности продукта.

Вариант 3 дополнительно включал кунжут, обогащая состав кальцием, лигнанами и фитостеролами, что расширяло его профилактический потенциал в отношении остеопороза и дислипидемии.

Вариант 4 объединил ячмень, чечевицу, лён и кунжут с добавлением инулина и корицы, обеспечив комплексное воздействие: инулин снижает скорость всасывания глюкозы и стимулирует рост бифидобактерий, а корица – за счёт кэйцина - повышает чувствительность тканей к инсулину, что совокупно приводило к выраженному гипогликемическому эффекту и улучшению моторики желудочно-кишечного тракта.

Вариант 5 заменил кунжут на морковный жмых, сохранив лён и чечевицу, что позволило обогатить продукт пектином и β-каротином, способствующими формированию гелеобразной структуры в кишечнике, замедлению всасывания углеводов и пролонгации чувства сытости.

Вариант 6 представляет собой экстремальную модель, содержащую повышенную дозу инулина (более 10,0 % от массы продукта) с целью определения порога толерантности организма к пребиотикам и выявления возможных негативных эффектов, таких как метеоризм и снижение органолептических качеств.

Вариант 7 представляет собой сравнительно оптимальную комплексную модель, объединяющую в себе все ключевые компоненты: гречиху и ячмень в качестве основы, чечевицу – как белковый компонент, лён и кунжут – источники полиненасыщенных жирных

кислот и антиоксидантов, морковный жмых – источник провитамина А, инулин - пребиотик и корицу - инсулинотропное средство. Данная комбинация обеспечивала синергетическое действие: снижение ГИ за счёт замедления всасывания глюкозы, стимуляцию микробиоты кишечника, противовоспалительный и антиоксидантный эффект, а также поддержку иммунной функции (табл.2).

Таблица 2. Рецептура выбранной крупяной смеси

Ингредиент	Массовая доля, %
Гречиха и ячмень (крупа) (1:1)	65,0
Чечевица колотая	18,0
Семена льна	5,0
Семена кунжута	5,0
Морковный жмых сублимационной сушки	5,0
Инулин	1,5
Корица молотая	0,5
Итого	**100,0**

Для выбранного варианта органолептическая оценка составила 4,8 балла по пятибалльной шкале, что является наибольшим значением среди рассмотренных вариантов. Отдельного внимания заслуживает интерпретация ГИ. Значение 36,8 ± 1,5 для выбранного варианта получено методом математического моделирования и носит прогнозный характер: оно не учитывает возможные изменения пищевой матрицы при варке и не заменяет экспериментального определения постпрандиального гликемического ответа. Поскольку факторный эксперимент не проводился, корректнее говорить о технологической и нутриентной взаимодополняемости компонентов, а не о доказанном синергетическом эффекте [1, с. 185–194; 10, с. 127–140].

В таблице 3 представлены показатели химического состава и варочных свойств указанной крупяной смеси для профилактического питания при сахарном диабете. Установлено, что массовая доля белка в сухом продукте составляла (в г/100 г продукта) ~14,2, а пищевых волокон - ~ 15,9, в варёном продукте удельные концентрации компонентов ожидаемо ниже вследствие поглощения воды. Коэффициент разваривания 2,6±0,1 и продолжительность приготовления 12–15 мин указывают на возможность использования рецептуры в формате крупы для повседневного приготовления. Потери сухих веществ в отвар составили в среднем 4,1±0,4 %, однако для вывода о стабильности всех функциональных веществ необходим их отдельный анализ до и после термической обработки.

Таблица 3. Показатели химического состава и варочные свойства выбранного варианта крупяной смеси

Показатель	Сухая смесь	После варки
Массовая доля влаги, %	9,8 ± 0,3	68,5 ± 1,2
Белки, г/100 г	14,2	5,1
Жиры, г/100 г	9,1	3,3
Углеводы, г/100 г	48,7	17,5

Показатель	Сухая смесь	После варки
Пищевые волокна, г/100 г	15,9	6,2
Энергетическая ценность, ккал/100 г	348	128
Коэффициент разваривания	—	2,6 ± 0,1
Потери сухих веществ, %	—	4,1 ± 0,4
Время варки, мин	—	12–15

а — сухая смесь *б — после варки*

Рисунок 1. Внешний вид разработанной поликомпонентной крупы

Перспективы внедрения смеси связаны с доступностью растительного сырья и возможностью выпуска продуктов с заданным составом. В промышленной разработке особое значение имеют стандартизация жмыха, защита липидов льна от окисления, контроль микробиологических показателей, аллергенов кунжута и глютена ячменя, а также испытания срока годности и поведения смеси при транспортировании. Эти вопросы рассматриваются в дальнейшем как задачи последующих исследований.

Заключение

На основе анализа растительного сырья и сравнения семи рецептурных подходов выделен состав поликомпонентной крупяной смеси из гречихи, ячменя, чечевицы, семян льна и кунжута, морковного жмыха, инулина и корицы. Итоговая рецептура объединяет зерновую основу (65 %) с белковым компонентом (18 %), масличными семенами (10%) и обогатительными ингредиентами (7%). Согласно данным представленного исследования, сухая смесь содержит 14,2 г белка и 15,9 г пищевых волокон на 100 г, готовится в течение 12–15 мин и характеризуется потерями сухих веществ 4,1 ± 0,4 %. Полученные характеристики дают основание рассматривать её как функционально ориентированный крупяной продукт.

Список литературы

1. Зверев С.В., Политуха О.В. Сбалансированный состав многокомпонентных круп в условиях концепции адекватного питания // Пищевые системы. – 2022. – Т. 5, № 3. – С. 185–194.
2. Giménez-Bastida J.A. Zieliński H. Buckwheat as a functional food and its effects on health // Journal of Agricultural and Food Chemistry. – 2015. – Т. 63, № 36. – P. 7896–7913.

3. Anderson J.W., Baird P., Davis R.H. Health benefits of dietary fiber // Nutrition Reviews. – 2009. – T. 67, № 4. – P. 188–205.
4. Vega-Gálvez A., Miranda M., Vergara J. [et al.] Nutrition facts and functional potential of quinoa (Chenopodium quinoa Willd.), an ancient Andean grain: a review // Journal of the Science of Food and Agriculture. – 2010. – T. 90, № 15. – P. 2541–2547.
5. Wood P.J. Dietary fibre and functional foods // British Journal of Nutrition. – 2004. – T. 91. – P. S1–S2.
6. Демидова Т.Ю., Короткова Т.Н., Кочина А.С. Пищевые волокна как элемент терапии пациентов с сахарным диабетом 2-го типа // Медицинский совет. – 2022. – Т. 16, № 10. – С. 104–109.
7. Bouchenak M., Lamri-Senhadji M. Nutritional quality of legumes, and their role in cardiometabolic risk prevention: a review // Journal of Medicinal Food. – 2013. – T. 16, № 3. – P. 185–198.
8. Лобанов В.Г., Росляков Ю.Ф., Маслинская М.Е. [и др.] Биохимический, минеральный и витаминный состав семян льна масличного белорусской селекции // Техника и технология пищевых производств. – 2024. – Т. 54, № 3. – С. 532–545.
9. Dugoua J.J., Seely D., Perri D. [et al.] From type 2 diabetes to antioxidant activity: a systematic review of the safety and efficacy of common and cassia cinnamon bark // Canadian Journal of Physiology and Pharmacology. – 2007. – T. 85, № 9. – P. 837–847.
10. Anderson R.A., Roussel A.M. Cinnamon, glucose and insulin sensitivity // Nutraceuticals, Glycemic Health and Type 2 Diabetes. – 2008. – P. 127–140.

References

1. Zverev, S.V. & Politukha, O.V. Sbalansirovannyy sostav mnogokomponentnykh krup v usloviyakh kontseptsii adekvatnogo pitaniya [Balanced composition of multicomponent groats in conditions of the adequate nutrition concept]. Pishchevye sistemy. Vol. 5. – 2022. (In Russ.).
2. Giménez-Bastida J.A. Zieliński H. Buckwheat as a functional food and its effects on health // Journal of Agricultural and Food Chemistry. – 2015. – Vol. 63, No. 36. – P. 7896–7913.
3. Anderson J.W., Baird P., Davis R.H. Health benefits of dietary fiber // Nutrition Reviews. – 2009. – Vol. 67, No. 4. – P. 188–205.
4. Vega-Gálvez A., Miranda M., Vergara J. [et al.] Nutrition facts and functional potential of quinoa (Chenopodium quinoa Willd.), an ancient Andean grain: a review // Journal of the Science of Food and Agriculture. – 2010. – Vol. 90, No. 15. – P. 2541–2547.
5. Wood P.J. Dietary fibre and functional foods // British Journal of Nutrition. – 2004. – Vol. 91. – P. S1–S2.
6. Demidova, T.Yu., Korotkova, T.N., & Kochina, A.S. (2022). Pishchevye volokna kak element terapii patsientov s sakharnym diabetom 2-go tipa [Dietary fiber as a treatment element for patients with type 2 diabetes]. Meditsinskiy sovet, (16(10)), 104–109. (In Russ.).

7. Bouchenak M., Lamri-Senhadji M. Nutritional quality of legumes, and their role in cardiometabolic risk prevention: a review // Journal of Medicinal Food. – 2013. – Vol. 16, No. 3. – P. 185–198.
8. Lobanov, V.G., Roslyakov, Yu.F., Maslinskaya, M.E. et al. Biokhimicheskiy, mineral'nyy i vitaminnyy sostav semyan l'na maslichnogo belorusskoy selektsii [Biochemical, mineral, and vitamin composition of oil flax seeds of Belarusian breeding]. Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv. Vol. 54. – 2024. (In Russ.).
9. Dugoua J.J., Seely D., Perri D. [et al.] From type 2 diabetes to antioxidant activity: a systematic review of the safety and efficacy of common and cassia cinnamon bark // Canadian Journal of Physiology and Pharmacology. – 2007. – Vol. 85, No. 9. – P. 837–847.
10. Anderson R.A., Roussel A.M. Cinnamon, glucose and insulin sensitivity // Nutraceuticals, Glycemic Health and Type 2 Diabetes. – 2008. – P. 127–140.

Статья поступила в редакцию: 06.11.2026
Статья принята к публикации: 16.11.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 546.56:546.47:577.16

Синтез и физико-химическая идентификация комплексов Cu(II) и Zn(II) с витаминами B_3 и B_6

Эргашев Вахоб Эргашевич
PhD, доц.
кафедры химии, Узбекский национальный педагогический университет имени Низами
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Махамадиев Шарофиддин Жумабоевич
преподаватель химии
Академический лицей при Гулистанском государственном педагогическом институте
Республика Узбекистан, г. Гулистан
Хаджибеков Садриддин Насриддинович
д-р пед. наук (DSc)
проф. кафедры физики и химии, Национальный исследовательский университет
Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Пулатхонова Мадинахон Акмалхон кизи
магистрант
Узбекский национальный педагогический университет имени Низами
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: vergashev9033@gmail.com

Synthesis and physicochemical identification of Cu(II) and Zn(II) complexes with vitamins B_3 AND B_6

Ergashev Vakhob Ergashevich
PhD, Associate Professor
Department of Chemistry, Nizami Tashkent State Pedagogical University
Republic of Uzbekistan, Tashkent
Makhamadiyev Sharofiddin Jumaboyevich
Chemistry Instructor
Academic Lyceum under the Gulistan State Pedagogical Institute
Republic of Uzbekistan, Gulistan
Khadzhibekov Sadriddin Nasriddinovich
doctor of Pedagogical Sciences (DSc)
professor, Department of Physics and Chemistry
National Research University "Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers"
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Библиографическое описание: Синтез и физико-химическая идентификация комплексов Cu(II) и Zn(II) с витаминами B_3 и B_6 // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Эргашев В.Э. [и др.]. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23730

Pulatkhonova Madinakhon Akmalkhon kizi
Master's Student, Nizami Tashkent State Pedagogical University
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

Цель - разработать проверяемую процедуру сопоставления условий синтеза, состава и строения комплексов Cu(II) и Zn(II) с никотинамидом и формами витамина B_6. Выполнен целевой анализ первичных структурных исследований и количественных аналитических данных. Методика объединяет сравнительный обзор, стехиометрический расчёт и адаптацию V-диаграммы Гоуина. Авторский результат - матрица пяти направлений проверки с уровнями полноты доказательств 0–2 и условиями допустимого структурного заключения. Рассмотрены пиридоксин, пиридоксаль и пиридоксамин; производные пиридоксаля выделены в самостоятельную категорию. На опубликованной паре никотинамидных комплексов рассчитано содержание воды 12,41 и 12,45 % при различном её распределении между координационной сферой и решёткой. Показано, почему суммарная потеря массы не устанавливает способ связывания воды. Приведён количественный пример слабого d–d-поглощения Cu(II) и объяснены ограничения спектроскопии d^{10}-Zn(II). Уточнены литературные условия синтеза и предлагаемые параметры ИК-спектроскопии, термогравиметрии и контрольных измерений. Разграничены опубликованные наблюдения, авторские расчёты и рекомендуемые процедуры. Разработка предназначена для университетских лабораторий Узбекистана. Следующий этап - экспериментальная апробация матрицы, проверка повторяемости независимых синтезов и согласованности экспертных оценок; собственные экспериментальные результаты в работе не заявляются.

Abstract

This study develops a verifiable procedure for relating synthesis conditions, composition, and structure of Cu(II) and Zn(II) complexes with nicotinamide and vitamin B_6 forms. Primary structural studies and quantitative analytical evidence were examined through a targeted review, stoichiometric calculation, and adaptation of the Gowin Vee diagram. The original methodological outcome is a five-domain matrix with evidence-completeness levels of 0–2 and explicit conditions for structural interpretation. Pyridoxine, pyridoxal, and pyridoxamine are considered, while pyridoxal derivatives are treated separately. For a published pair of nicotinamide complexes, calculated water contents of 12.41 and 12.45 % correspond to different distributions between coordination and lattice positions. Thus, total mass loss cannot establish the water-binding mode. A quantitative example of weak Cu(II) d–d absorption illustrates the limitations of spectroscopy for d^{10}-Zn(II). Published synthesis conditions and proposed parameters for infrared spectroscopy, thermogravimetry, and control measurements are specified. Published observations, original calculations, and recommended procedures are distinguished. The framework targets university laboratories in Uzbekistan. Experimental validation, independent-batch reproducibility, and inter-rater agreement require further investigation; no original experimental results are claimed.

Ключевые слова: никотинамид, пиридоксин, пиридоксаль, пиридоксамин, координация, термогравиметрия, V-диаграмма Гоуина.

Keywords: nicotinamide, pyridoxine, pyridoxal, pyridoxamine, coordination, thermogravimetry, Gowin Vee diagram.

Введение

Никотинамид (B_3) и формы B_6 различаются донорными центрами и протонированием. Известны разные окружения металла при одинаковом M:L [1; 2], равновесия Cu(II) с формами B_6 [3] и комплексы производных пиридоксаля [4; 5]. Проблема - недостаточность отдельного спектрального признака для назначения структуры. Цель обзорно-методической работы - определить достаточные основания для связи состава, координации и свойств.

Материалы и методы

Поиск 11.11.2026 на сайтах издателей и в репозиториях: Cu(II)/Zn(II), названия лигандов, synthesis, crystal structure, thermal analysis. Включались работы с формулой и количественными либо структурными данными [1–7]; методы – [8–10]. Сопоставляли среду, реагенты, доноры и воду. Собственный синтез не проводился.

Протокол [2]: 1 ммоль $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ и 2 ммоль никотинамида в 10 мл этанола–воды (1:1), кипячение с обратным холодильником 1 ч, охлаждение, фильтрование, испарение три недели. Для равновесий Cu(II)–B_6 использованы 25 °C и 0,1 M KNO_3 [3]. Для апробации предлагаются: ATR-ИК 4000–400 $см^{-1}$, разрешение 4 $см^{-1}$, 32 накопления; ТГ/ДТГ 25–700 °C, 5–10 мг, 10 К/мин, N_2 60 мл/мин. Контроли - лиганд, соль, физическая смесь при одинаковом pH. Фиксируют калибровку, сушку; для РСА - длину волны, температуру, R1, wR2 и CIF.

Результаты

Пиридоксин содержит фенольную и гидроксиметильные группы; пиридоксамин образует N,O-хелат через аминометильный N и фенолятный O [3; 6]. Для пиридоксаля разграничивают витамин и продукт конденсации: N_2O_2-узел основания Шиффа [4] характеризует производное. Никотинамид связывается пиридиновым N [1].

Для формул из [1] $[Zn(Nia)_2(H_2O)_4](ClO_4)_2$ и $[Cu(Nia)_2(H_2O)_2](ClO_4)_2 \cdot 2H_2O$ (Nia - никотинамид) нами рассчитано $w(H_2O) = 100 \times n \times 18{,}015/M$: 12,41 и 12,45 % соответственно; n - число H_2O, M - молярная масса. У Zn все четыре H_2O координированы, у Cu две - решёточные. Различие - 0,04 п.п.; близкая потеря массы не определяет расположение воды.

Для Cu(II) с пиридоксаль-бензоилгидразоном при 2 мМ в метаноле опубликованы λ = 672–680 нм и log ε = 1,54–1,85 [5]; пересчёт даёт $\varepsilon \approx 35–71$ $л \cdot моль^{-1} \cdot см^{-1}$. У d^{10}-Zn(II) d–d-поглощение отсутствует [2]. Геометрию подтверждают независимо; интервал Cu(II) относится к цитируемой серии.

В адаптированной V-диаграмме [10] донорные центры связывают с измерениями пробы, альтернативным объяснением и различающим опытом. Авторская матрица (табл. 1) задаёт уровни: 0 - данных нет, 1 - частичное, 2 - достаточное подтверждение; количественное согласие оценивают в пределах погрешности.

Таблица 1. Авторская матрица проверки доказательств

Направление	Уровень 1	Уровень 2
Состав	Металл либо CHN	CHN и металл: одна формула
Фаза	Новая дифрактограмма	Модель; примеси < ПО
Координация	Спектральные данные	РСА: доноры, КЧ, геометрия
Вода	ТГ и расчёт	ТГ–ИК/МС; H_2O по РСА
Повторяемость	Одна партия	3 партии: те же состав и фаза

ПО - предел обнаружения примесей. Заключение об объёмной фазе требует уровня 2 по составу, фазе и координации; о гидратации - по воде. Три независимые партии - предлагаемый критерий апробации. Суммарный балл не компенсирует пробелы; рубрика требует валидации.

Обсуждение

Температура удаления воды не определяет её тип; при перекрытии стадий проверяют состав газа и остатка [8]. В Узбекистане сочетание ИК, элементного, порошкового и термического анализа применено в [7]. Матрица выявляет пробелы; её результативность ещё не проверена. Идентификация не доказывает биологическую активность.

Заключение

Предложены пятикомпонентная матрица и критерии достаточности. Расчёт гидратации и спектральный пример обосновывают независимую проверку состава, воды и координации. Уточнены формы B_6 и условия измерений. Следующий этап - экспериментальная апробация и оценка согласованности экспертных заключений.

Список литературы

1. Rukk N.S. et al. Complexes of Zinc(II)- and Copper(II) Perchlorates with Nicotinamide: Synthesis, Structure, Cytotoxicity // Russ. J. Inorg. Chem. – 2022. – T. 67. – P. 1184–1190. – DOI: 10.1134/S0036023622080228.
2. Pricop L. et al. Three Complexes of Zn(II) with Nicotinamide. A Mono, a Di, and a Polynuclear Compound // Crystals. – 2026. – T. 16. – Art. 110. – DOI: 10.3390/cryst16020110.
3. Chylewska A. et al. Spectrophotometric, potentiometric, and conductometric studies of binary complex formation between copper(II) and three forms of vitamin B6 in aqueous solutions // J. Coord. Chem. – 2015. – T. 68. – P. 3761–3775. – DOI: 10.1080/00958972.2015.1088149.
4. Omidinia R. et al. Synthesis, characterization, DFT and antibacterial studies of a novel vitamin B6 Schiff base and its Cu(II) and Zn(II) complexes // J. Mol. Struct. – 2022. – T. 1248. – Art. 131452. – DOI: 10.1016/j.molstruc.2021.131452.
5. Gatto C.C. et al. Effects of changing ions on the crystal design, non-covalent interactions, antimicrobial activity, and molecular docking of Cu(II) complexes with a pyridoxal-hydrazone ligand // Front. Chem. – 2024. – T. 12. – Art. 1347370. – DOI: 10.3389/fchem.2024.1347370.

6. Thompson D.M. et al. Reactions of metal ions with vitamins. IV. The crystal structure of a zinc complex of pyridoxamine (Vitamin B6) // Inorg. Chim. Acta. – 1980. – T. 46. – P. 199–203. – DOI: 10.1016/S0020-1693(00)84191-2.
7. Gazieva A., Smanova Z., Abdullaeva Kh. Physicochemical characterization of the coordination behavior of glutaric and 4-pyridinecarboxylic acids in Co(II) and VO(II) complexes // Acta NUUz. 2026. Vol. 3, No. 3.2. P. 390–393. DOI: 10.69617/nuuz.v3i3.2.12928.Koga N. et al. ICTAC Kinetics Committee recommendations for analysis of thermal decomposition kinetics // Thermochim. Acta. 2023. Vol. 719. Art. 179384. DOI: 10.1016/j.tca.2022.179384.
8. Nakamoto K. Infrared and Raman Spectra of Inorganic and Coordination Compounds. Part B. 6th ed. Wiley. – 2009. – DOI: 10.1002/9780470405888.
9. Novak J.D., Gowin D.B. Learning How to Learn. Cambridge University Press. – 1984. – DOI: 10.1017/CBO9781139173469.

Статья поступила в редакцию: 06.10.2026
Статья принята к публикации: 13.11.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 663.15

DOI: 10.32743/UniTech.2026.152.11.23723

Изучение процесса инкапсуляции с использованием белковых и полисахаридных матриц

Эргашова Зилола Аваз кизи
докторант
Ташкентский химико-технологический институт
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: z.ergashova@tkti.uz

Салижонова Шахнозахон Дилмуродовна
DSc по техн. наукам, доц.
Ташкентский химико-технологический институт
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Рузибаев Акбарали Турсинбаевич
DSc по техн. наукам, проф.
Ташкентский химико-технологический институт
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Study of the encapsulation process using protein and polysaccharide matrices

Ergashova Zilola Avaz kizi
Doctoral candidate, Tashkent Institute of Chemical Technology
Uzbekistan, Tashkent

Salijonova Shakhnozakhon Dilmurodovna
DSc in Technical Sciences, Associate Professor, Tashkent Institute of Chemical Technology
Uzbekistan, Tashkent

Ruzibaev Akbarali Tursinbayevich
DSc in Technical Sciences, Professor
Tashkent Institute of Chemical Technology
Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

Разработка стабильных систем доставки молочнокислых бактерий (МКБ) является актуальной задачей технологии функциональных пищевых продуктов. Целью исследования являлась сравнительная оценка систем инкапсуляции штамма Lacticaseiobacillus casei с использованием белковых и полисахаридных матриц. В качестве материалов микрокапсул

Библиографическое описание: Эргашова З.А. кизи, Салижонова Ш.Д., Рузибаев А.Т. Изучение процесса инкапсуляции с использованием белковых и полисахаридных матриц // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23723

исследовали казеинат натрия, гороховый белок, мальтодекстрин, а также многослойную систему на основе мальтодекстрина, хитозана и уксусной кислоты. Инкапсуляцию проводили методом эмульгирования с последующей сушкой. Оценивали выход сухого порошка, pH и жизнеспособность бактерий методом посева на агар MRS непосредственно после инкапсуляции, через две недели и через один месяц хранения. Установлено, что выход порошка для исследуемых систем составлял 22,6–50,2 г. Наибольшую сохранность жизнеспособности МКБ обеспечивала система на основе горохового белка: через месяц хранения количество жизнеспособных клеток превышало 300 КОЕ при разведении 10^{-5}. Для казеинатной системы сохранялось до 49 КОЕ при разведении 10^{-7}. Мальтодекстриновые и многослойные системы характеризовались более низкой стабильностью бактерий при хранении. Полученные результаты показывают перспективность применения белковых матриц, прежде всего горохового белка, для повышения сохранности пробиотических культур при разработке функциональных продуктов.

Abstract

The development of stable delivery systems for lactic acid bacteria (LAB) is an important task in the technology of functional foods. The aim of this study was to compare encapsulation systems for Lacticaseiobacillus casei using protein- and polysaccharide-based matrices. Sodium caseinate, pea protein, maltodextrin, and a multilayer system based on maltodextrin, chitosan and acetic acid were investigated as encapsulation materials. Encapsulation was performed by emulsification followed by drying. The yield of dry powder, pH, and bacterial viability were evaluated by plating on MRS agar immediately after encapsulation, after two weeks, and after one month of storage. The powder yield of the studied systems ranged from 22.6 to 50.2 g. The pea-protein system provided the highest preservation of LAB viability: after one month of storage, more than 300 CFU were detected at a 10^{-5} dilution. The sodium-caseinate system retained up to 49 CFU at a 10^{-7} dilution. Maltodextrin-based and multilayer systems showed lower bacterial stability during storage. The results indicate the potential of protein matrices, particularly pea protein, for improving the preservation of probiotic cultures in functional food applications.

Ключевые слова: молочнокислые бактерии, инкапсуляция, Lacticaseiobacillus casei, казеинат натрия, гороховый белок, мальтодекстрин, пробиотики.

Keywords: lactic acid bacteria, encapsulation, Lacticaseiobacillus casei, sodium caseinate, pea protein, maltodextrin, probiotics.

Введение

Молочнокислые бактерии широко применяются в пищевой промышленности благодаря пробиотическим свойствам и потенциальному положительному влиянию на здоровье человека [3–6, 8]. Вместе с тем жизнеспособность пробиотических микроорганизмов может существенно снижаться под воздействием кислорода, влаги, неблагоприятного значения pH, технологической обработки и длительного хранения. Поэтому разработка систем доставки, обеспечивающих защиту клеток и сохранение их функциональной активности, является важным направлением современной пищевой биотехнологии [3, 4, 8].

Одним из перспективных подходов является инкапсуляция с использованием белковых и полисахаридных матриц. Свойства материала оболочки влияют на физико-химические характеристики микрокапсул, степень защиты клеток и их сохранность в процессе хранения [6, 1, 2, 12, 13]. Белковые матрицы могут формировать защитную среду вокруг клеток, тогда как полисахариды позволяют регулировать структуру и барьерные свойства капсулы. Многослойные системы рассматриваются как способ дополнительного повышения стабильности инкапсулированных микроорганизмов [6].

Цель настоящего исследования заключалась в сравнительной оценке эффективности систем инкапсуляции штамма Lacticaseiobacillus casei с использованием казеината натрия, горохового белка, мальтодекстрина и многослойной системы на основе мальтодекстрина и хитозана. Научная новизна работы состоит в сопоставлении указанных матриц по выходу сухого продукта, pH и сохранности жизнеспособности МКБ при хранении на основе экспериментальных данных, полученных для одного исследуемого штамма.

Материалы и методы

Объектом исследования являлся штамм Lacticaseiobacillus casei. Для инкапсуляции использовали казеинат натрия, гороховый белок, мальтодекстрин, а также многослойную систему, включавшую мальтодекстрин, хитозан и уксусную кислоту. Выбор матриц обусловлен необходимостью сравнения белковых, полисахаридных и многокомпонентных систем.

Процесс инкапсуляции осуществляли методом эмульгирования с последующей сушкой. После получения сухих микрокапсул определяли физико-химические показатели, включая pH, вязкость, активность воды, массовую долю влаги, цвет и растворимость. В настоящей статье представлены показатели выхода сухого порошка и pH, а также данные о жизнеспособности МКБ, поскольку именно эти характеристики были количественно отражены в исходных результатах исследования.

Жизнеспособность МКБ оценивали методом посева на агар MRS с последующим подсчётом колониеобразующих единиц (КОЕ) при соответствующих разведениях. Определение проводили непосредственно после инкапсуляции, через две недели и через один месяц хранения.

Результаты и обсуждение

Результаты показали, что тип матрицы существенно влияет на выход сухого продукта, значение pH и сохранность жизнеспособности бактерий. Количественные характеристики исследованных систем представлены в таблице 1.

Таблица 1. Физико-химические показатели исследованных систем инкапсуляции

№	Форма матрицы	Количество сухого порошка, г	pH
1	Казеинат + LAB	49,5	6,8
2	Гороховый белок + LAB	22,6	7,1
3	Мальтодекстрин + LAB	50,2	3,0–3,5

№	Форма матрицы	Количество сухого порошка, г	pH
4	Мальтодекстрин + хитозан + LAB	43,3	3,5

Микрокапсулы на основе казеината натрия характеризовались выходом сухого порошка около 49,5 г и нейтральным значением pH 6,8. После одного месяца хранения сохранялась умеренная жизнеспособность МКБ – до 49 КОЕ при разведении 10^{-7}. Полученный результат указывает на способность казеинатной матрицы обеспечивать определённую степень защиты клеток при хранении.

Использование горохового белка сопровождалось меньшим выходом сухого порошка - 22,6 г, однако обеспечивало наиболее высокую сохранность бактерий среди исследованных вариантов. Спустя один месяц количество жизнеспособных клеток превышало 300 КОЕ при разведении 10^{-5}. Это позволяет рассматривать гороховый белок как перспективную защитную матрицу для пробиотических микроорганизмов, что согласуется с опубликованными данными о потенциале белковых систем для повышения стабильности пробиотиков [9, 13].

Системы на основе мальтодекстрина обеспечивали высокий выход порошка – 50,2 г, однако характеризовались кислой реакцией среды (pH 3,0 – 3,5). В процессе хранения жизнеспособность МКБ резко снижалась. Таким образом, высокий выход сухого продукта сам по себе не является достаточным критерием выбора матрицы, если одновременно снижается сохранность жизнеспособных клеток.

Многослойные микрокапсулы с использованием мальтодекстрина, хитозана и уксусной кислоты имели выход 43,3 г и pH 3,5. Несмотря на хорошую структурную стабильность, начальная жизнеспособность бактерий была низкой и снижалась до минимальных значений уже через две недели хранения. Следовательно, усложнение состава оболочки не гарантирует повышения биологической стабильности инкапсулированных клеток и требует оптимизации состава и технологических параметров [6].

Особого внимания заслуживает низкое значение pH, установленное для мальтодекстриновой (3,0 – 3,5) и многослойной (3,5) систем инкапсуляции. Следует учитывать, что мальтодекстрин представляет собой нейтральный углеводный носитель, поэтому его использование само по себе не объясняет выраженное подкисление системы. Одним из возможных факторов, обусловивших полученные значения pH, может быть присутствие органических кислот, образующихся в результате метаболической активности молочнокислых бактерий на стадии культивирования или подготовки бактериальной суспензии до инкапсуляции. Также нельзя исключать влияние состава исходной культуральной среды и особенностей технологического процесса. Вместе с тем данные факторы в настоящем исследовании отдельно не оценивались, поэтому для установления причин изменения кислотности необходимы дополнительные исследования.

Зависимость сохранности пробиотических микроорганизмов от состава инкапсулирующей матрицы подтверждается результатами ранее проведённых исследований. Так, Gul et al. [15] показали, что эффективность защиты Lacticaseibacillus casei зависит от комбинации используемых инкапсулирующих компонентов. В то же время Santos et al. [14] продемонстрировали возможность получения микрокапсул L. casei с высокой

жизнеспособностью при использовании мальтодекстрина в качестве защитного материала. Полученные литературные данные свидетельствуют о том, что эффективность мальтодекстриновых систем определяется не только природой носителя, но и составом композиции, а также технологическими условиями инкапсуляции и сушки.

Дополнительным фактором, потенциально влияющим на жизнеспособность бактерий в многослойной системе, является использование уксусной кислоты для растворения хитозана. Поскольку хитозан обладает ограниченной растворимостью в воде при нейтральных значениях pH, для его растворения обычно применяют слабокислую среду. В опубликованных исследованиях по формированию гибридных микрокапсул на основе целлюлозы и хитозана также описано использование уксусной кислоты для приготовления хитозанового раствора с pH около 3,5. Таким образом, присутствие уксусной кислоты и связанное с ним снижение pH могли стать дополнительными факторами, ограничивающими сохранность молочнокислых бактерий в исследуемой многослойной системе. Однако непосредственное влияние концентрации кислоты и продолжительности контакта с ней на жизнеспособность клеток в настоящей работе не определялось. В связи с этим дальнейшие исследования целесообразно направить на оптимизацию концентрации уксусной кислоты, кислотности хитозанового раствора и условий формирования многослойной оболочки с учётом необходимости сохранения растворимости хитозана и жизнеспособности бактериальных клеток.

Сравнение исследованных систем показывает различие между технологическим выходом порошка и биологической эффективностью защиты. Максимальный выход наблюдался для мальтодекстриновой системы, тогда как наилучшая сохранность жизнеспособности была характерна для горохового белка. Таким образом, при выборе материала микрокапсул для функциональных продуктов необходимо учитывать не только выход сухого продукта, но и способность матрицы сохранять жизнеспособность пробиотической культуры.

Заключение

Проведённое исследование показало, что эффективность инкапсуляции Lacticaseibacillus casei в значительной степени определяется типом используемой матрицы. Выход сухого порошка для исследованных систем составлял 22,6 – 50,2 г. Наиболее высокая сохранность жизнеспособности МКБ была отмечена для системы на основе горохового белка: спустя один месяц хранения количество жизнеспособных клеток превышало 300 КОЕ при разведении 10^{-5}. Казеинатная система обеспечивала более умеренную сохранность – до 49 КОЕ при разведении 10^{-7}. Мальтодекстриновая и многослойная системы характеризовались более низкой стабильностью бактерий при хранении.

Полученные результаты подтверждают перспективность белковых матриц, особенно горохового белка, для разработки систем доставки пробиотических культур в функциональных пищевых продуктах и нутрицевтиках. Для дальнейшего развития исследования целесообразно дополнительно определить эффективность инкапсуляции в процентах, размер частиц, активность воды, влажность, динамику КОЕ с указанием повторностей и статистической значимости, а также устойчивость микрокапсул в моделируемых условиях желудочно-кишечного тракта.

Список литературы

1. Isayeva A.B. et al. Physicochemical properties of microcapsules based on natural polymers containing probiotic microorganisms // Academic Scientific Journal of Chemistry. – 2025. – T. 3, № 464. – P. 140–154.
2. Madybekova G. et al. Microencapsulation of probiotic microorganisms to enhance their stability and survival // Academic Journal of Physical and Chemical Sciences. – 2023. – Vol. 347. – No. 3. – P. 157–171.Agriopoulou S. et al. Encapsulation of Probiotics within Double/Multiple Layer Coatings: Strategies and Food Applications // Molecules. – 2024. – Vol. 29, Issue 11. – Art. 2431.
3. Anal A.K., Singh H. Recent advances in microencapsulation of probiotics for industrial applications and targeted delivery // Trends in food science & technology. – 2007. – T. 18, № 5. – P. 240–251.
4. Burgain J. et al. Encapsulation of probiotic living cells: From laboratory scale to industrial applications // Journal of food engineering. – 2011. – T. 104, № 4. – P. 467–483.
5. D’Amico V. et al. Microencapsulation of Probiotics for Enhanced Stability and Health Benefits in Dairy Functional Foods: A Focus on Pasta Filata Cheese // Pharmaceutics. – 2025. – T. 17, № 2. – Art. 185.
6. Saiz-Gonzalo G. et al. Pea protein microencapsulation improves probiotic survival during gastrointestinal digestion // International Journal of Food Science and Technology. – 2025. – T. 60, № 2.
7. Altamirano-Ríos A.V. et al. Effect of encapsulation methods and materials on the survival and viability of Lactobacillus acidophilus: A review // International Journal of Food Science and Technology. – 2022. – T. 57, № 7. – P. 4027–4040.
8. Safeer Abbas M. et al. Probiotic viability as affected by encapsulation materials: Recent updates and perspectives // International Journal of Food Properties. – 2023. – T. 26, № 1. – P. 1324–1350.
9. Bora A.F. M. et al. Development, characterization and probiotic encapsulating ability of novel Momordica charantia bioactive polysaccharides/whey protein isolate composite gels // International Journal of Biological Macromolecules. – 2023. – T. 225. – P. 454–466.
10. Sun Q. et al. Biomaterials and encapsulation techniques for probiotics: current status and future prospects in biomedical applications // Nanomaterials. – 2023. – T. 13. – Art. 2185.
11. Vivek K. et al. A comprehensive review on microencapsulation of probiotics: technology, carriers and current trends // Applied Food Research. – 2023. – T. 3, № 1. – Art. 100248.
12. Zhang J. et al. Protein-Based Probiotic Delivery Systems: Structural Basis, Functional Roles, and Food Applications // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. – 2026. – T. 25, № 5.
13. Santos et al. (2014) Microencapsulation of Lactobacillus casei by spray drying // Journal of Microencapsulation, 31(8), P 759–767. – 2014. – P. 759–767.

14. Gul et al. Effect of different encapsulating agent combinations on viability of Lactobacillus casei Shirota during storage, in simulated gastrointestinal conditions and dairy dessert. Food Science and Technology International, 25(7), P 608–617. – 2019.

ИНФРАСТРУКТУРА И ТРАНСПОРТ

СТРОИТЕЛЬСТВО, АРХИТЕКТУРА И ЖИЛИЩНО-КОММУНАЛЬНОЕ ХОЗЯЙСТВО

Статья поступила в редакцию: 10.11.2026
Статья принята к публикации: 17.11.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 711.4

DOI: 10.32743/UniTech.2026.152.11.23746

Градостроительные принципы развития туристских поселений - горнолыжных курортов

Гейда Антон Васильевич
магистрант
Московский архитектурный институт (государственная академия)
Российская Федерация, г. Москва
E-mail: geydaav@yandex.ru

Шемякина Вероника Александровна
канд. архитектуры, доц.
кафедры Градостроительство Московский архитектурный институт (государственная академия)
Российская Федерация, г. Москва
E-mail: v_shemyakina@internet.ru

Urban planning principles for the development of tourist settlements — ski resorts

Geyda Anton Vasilyevich
Master's student Moscow Architectural Institute (State Academy)
Russian Federation, Moscow

Shemyakina Veronika Alexandrovna
candidate of Architecture, Associate Professor
Department of Urban Planning Moscow Architectural Institute (State Academy)
Russian Federation, Moscow

Библиографическое описание: Гейда А.В., Шемякина В.А. Градостроительные принципы развития туристских поселений - горнолыжных курортов // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23746

Аннотация

В статье рассматриваются закономерности пространственного развития туристских поселений, специализирующихся на горнолыжном туризме в условиях ограниченности территориальных ресурсов, сезонных колебаний населения и возрастающих требований к устойчивости городской среды. Цель исследования — выявление общих градостроительных принципов развития горнолыжных курортов на основе сопоставления европейских и североамериканских моделей пространственной организации. Объектами исследования выступают девять курортных поселений Европы и Северной Америки: Церматт, Давос, Кран-Монтана, Китцбюэль, Аспен, Брекенридж, Парк-Сити, Вейл и Уистлер. Методология включает сравнительный морфологический и картографический анализ, ГИС-анализ освоенных территорий, оценку морфологической и условной пиковой плотности населения, а также изучение документов территориального планирования и стратегий пространственного развития. Установлены различия между альпийской и североамериканской моделями расселения, проявляющиеся в плотности, планировочной структуре и распределении функциональных зон. Выявлена общая тенденция перехода от экстенсивного территориального роста к управляемой пространственной консолидации существующей застройки. На основе сравнительного анализа сформулированы семь взаимосвязанных градостроительных принципов, охватывающих регулирование пространственного роста. Предложена концептуально-параметрическая модель пространственного развития туристских поселений, объединяющая выявленные принципы в единую систему градостроительного регулирования.

Abstract

This article examines the patterns of spatial development of tourist settlements specializing in ski tourism under conditions of limited land resources, seasonal population fluctuations, and increasing demands for urban environmental sustainability. The aim of the study is to identify common urban planning principles governing the development of ski resorts through a comparative analysis of European and North American models of spatial organization. The study focuses on nine resort settlements in the Alps and North America: Zermatt, Davos, Crans-Montana, Kitzbühel, Aspen, Breckenridge, Park City, Vail, and Whistler. The research methodology combines comparative morphological and cartographic analysis, GIS-based analysis of developed areas, assessment of morphological and estimated peak population densities, and examination of spatial planning documents and development strategies. The findings reveal differences between Alpine and North American settlement models in terms of population density, urban spatial structure, and the distribution of land-use functions. A common trend towards a transition from extensive territorial expansion to managed spatial consolidation of existing built-up areas is identified. Based on the comparative analysis, seven interrelated urban planning principles addressing the regulation of spatial growth are formulated. A conceptual-parametric model for the spatial development of tourist settlements is proposed, integrating the identified principles into a comprehensive framework for urban spatial planning and regulation.

Ключевые слова: туристские поселения, горнолыжный курорт, типология курортных поселений, устойчивое территориальное развитие, альпийская модель расселения.

Keywords: tourist settlement, ski resort, typology of resort settlements, sustainable territorial development, alpine settlement model.

Введение

Горнолыжные курорты представляют собой особый тип туристских поселений, пространственная структура которых формируется на пересечении городской, рекреационной и природной систем. Пространственное развитие определяется потребностями постоянного населения, временно пребывающих туристов, работников сезонной экономики, размещением горнолыжных подъёмников, транспортной доступностью и ограниченной пригодностью горных территорий для строительства. В результате возникают специфические сочетания компактных общественно-туристических ядер, рассредоточенных жилых и гостиничных районов, специализированных рекреационных объектов и обширных природных пространств. Современное состояние исследований по выбранной теме характеризуется фрагментарностью: градостроительные аспекты развития туристских поселений такого типа рассматриваются преимущественно в прикладных документах территориального планирования и мастер-планах. Во второй половине XX века рост популярности массового зимнего туризма сопровождался преобразованием исторических горных поселений и созданием новых планируемых курортов. Историко-градостроительная эволюция горных станций, рассмотренная Ф. Делормом (Delorme, 2014), показывает разнообразие способов интеграции курортной функции в сложившуюся среду. Ф. Пиа (Pia, 2019) связывает перспективы развития горных поселений с уплотнением и реорганизацией инфраструктуры вместо дальнейшей экспансии малоэтажной застройки. В Северной Америке исследователи обратили внимание на переход от преимущественно девелоперской логики роста к управлению его последствиями для территории и местных жителей: А. Гилл и П. Уильямс сопоставили практики Aspen и Whistler (Gill, Williams, 1994), а А. Гилл проследила эволюцию механизмов регулирования Whistler (Gill, 2000). Современный этап развития курортных поселений характеризуется изменением системы ограничений. Наряду с дефицитом пригодных для освоения территории возрастают требования к сохранению природного и культурного ландшафта, доступности жилья, экологической и инфраструктурной ёмкости территории, а также к снижению зависимости от индивидуального автотранспорта. Масштабы и характер климатических рисков для горнолыжной индустрии обобщены в международном обзоре R. Steiger и соавторов (2019). Исследование J.-D. Gerber и M. Bandi Tanner (2018) показывает, что распространение вторых резиденций является не только жилищным, но и пространственно-политическим фактором преобразования альпийских муниципалитетов. Следовательно, устойчивость курорта не может оцениваться исключительно по расширению трасс, количеству мест размещения или туристическому потоку. Пространственное планирование горнолыжных поселений изучается в нескольких относительно самостоятельных исследовательских направлениях: история и морфология курортной застройки, управление территориальным ростом, размещение туристической инфраструктуры, экологическая пригодность горных ландшафтов, регулирование вторых резиденций и жилья работников. Настоящая статья опирается на

действующие документы территориального планирования и актуальные мастер-планы рассматриваемых поселений [1–10], результаты ГИС-анализа (Рисунок 1, 2), что обеспечивает достоверность данных и их сопоставимость.

Цель исследования — выявить общие градостроительные принципы, обеспечивающие устойчивость пространственного развития горнолыжных курортов как туристских поселений, и предложить концептуальную параметрическую теоретическую модель. Исследовательские задачи включают: типологизацию планировочных структур по происхождению и характеру расселения, сопоставление морфологической и условной пиковой плотности, анализ подходов к развитию, функциональному зонированию, ограничениям, транспортной организации и жилищной политике, систематизацию повторяющихся принципов. Научная новизна работы состоит в сопоставлении европейской (альпийской) и североамериканской моделей на единой системе измеримых параметров. В статье приведены результаты анализ текущего состояние территорий поселений, а также анализа актуальных градостроительных концепций развития европейских альпийских и североамериканских курортов.

Методология

Репрезентативный ряд объектов исследования отобран по функционально-типологическим, природно-климатическим, пространственно-масштабным критериями (параметрами) отбора. Основными факторами отбора послужили: туристско-рекреационная специализации поселений с основной функцией в виде горнолыжного курорта и численность населения в диапазоне приблизительно 4,6 – 16 тыс. чел., что релевантно современному понятию «сверхмалого города». В работе рассмотрены поселения курортно-рекреационного типа. Европейские альпийские курортные поселения: Zermatt, Davos, Crans-Montana, Kitzbühel и поселения Северной Америки: Aspen, Breckenridge, Park City, Vail, Whistler. Проведён анализ документов территориального планирования, градостроительный анализ территории поселений на основе материалов из открытых источников, ГИС-порталов, актуальных мастер планов поселений и их частей. Для выявления закономерностей пространственно-функциональной организации горнолыжных городов применён комплексный сравнительный подход. Границами исследования определены освоенные территории поселений. Для каждого поселения приведены параметры плотности административной и морфологической, коэффициент плотности застройки. Сезонная плотность (пиковая) рассчитана по формуле

$$D = \frac{P + B * 0,8}{S}$$

где: D – плотность (пиковая), P – численность постоянного населения, B – кол-во мест размещения, S – площадь освоенной тер-и, 0,8 – коэффициент пиковой загрузки. Для расчёта показателей пиковой плотности приняты данные из открытых статистических источников о ёмкости мест размещений, опубликованные в официальных источниках и округлены до круглых значений.

Альпийские туристские поселения

Европейская модель горнолыжных курортов характеризуется компактной морфологией, высокой плотностью и пешеходной доступностью, сформированной в результате исторического развития.

Таблица 1. Основные характеристики

Наименование	Постоянное население чел.	Кол-во мест раз-я чел.	Площадь освоенной тер-и км^2	Плотность (морфологическая) чел./км^2	Плотность (пиковая) чел./км^2
Zermatt	5 922	30 000	1,9	3100	15 750
Davos	12 771	28 000	3,56	3600	9 900
Crans-Montana	10 496	45 000	6,47	1600	7200
Kitzbühel	8 281	10 000	3,35	2500	4900

Zermatt – туристский город, сформированный на основе исторических альпийских сельских поселений, в XX веке превратился в круглогодичный горнолыжный курорт, сохранив историческую структуру и характерный альпийский облик. Город относится к морфотипу компактного альпийского долинного курортного поселения линейно-узлового типа, в котором историческое ядро и центральная общественно-туристическая ось формируют плотную смешанную ткань, периферийные участки представлены более разреженной жилой и гостиничной застройкой. Выраженный центральный узел – историческое компактное деревенское ядро альпийского типа, планировочная структура вытянута вдоль долинного коридора и главной оси, которая является центральной общественно-туристической осью с высокой концентрацией функций: торговли, сервиса и туристической активности. Для ядра характерна высокая плотность застройки, а жилые и гостиничные пояса, снижают интенсивность по мере удаления от центра к периферии. Система общественных пространств имеет полицентрический и иерархичный характер и включает: пересадочные узлы, коммерческие пешеходные променады, видовые пространства, историко-мемориальные места, рекреационно-спортивные открытые территории, ландшафтные пространства и туристическую инфраструктуру. Общественные пространства формируется в условиях безавтомобильного режима.

Концепция пространственного развития [1], разработана в период с 2011 по 2013 год была пересмотрена в 2022 году при участии ключевых заинтересованных сторон, содержит долгосрочные цели пространственного развития и планирования с горизонтом в 10 – 15 лет. Пересмотр территориального планирования и адаптация принципов пространственного развития демонстрирует переход от экстенсивного освоения к ограничению периферийного строительства и сохранению существующей плотности застройки. Главная идея — управляемое развитие компактного альпийского курортного поселения с сохранением природного ландшафта, исторической застройки и баланса между туристической экономикой и потребностями постоянного населения. Документ содержит описание мер, направленных на сохранение открытых пространств, точечное развитие внутри поселения, сохранение

историко-архитектурной идентичности центра, обеспечение доступности постоянного жилья, ограничение второго жилья, совершенствование пешеходной и велосипедной сети, общественного транспорта.

Davos - высокогорный курортно-туристский город, сформировавшийся на основе рассредоточенных сельских поселений, можно отнести к модели полицентричного линейного курортного города, где центры с осями пешеходных улиц образуют каркас города. С конца XIX – начала XX века санаторно-курортная застройка радикально изменила морфологию места, когда на смену сельской ткани пришли санатории, гостиницы, пансионы, рестораны и жилые дома, а крупные клинические корпуса стали важными доминантами. В XX веке массовая автомобилизация и рост популярности курорта привели к росту объёма второго жилья, что в свою очередь сильно повлияло на образ города и сформировало урбанизированный морфотип застройки, появились жилые комплексы апартаментов, конгрессы-центры, спортивные и образовательные центры вокзальные и туристические узлы. Вместе с тем периферийные части до сих пор сохраняют сельский характер. Система общественных пространств имеет линейно-сетевой характер и состоит из пространств прибытия, продольных общественных осей, центральных событийных площадей, парковых и ландшафтных зон, озёрных набережных, спортивно-рекреационных пространств. Общественная жизнь организована вдоль прогулочных осей с несколькими узлами.

Пространственная концепция развития муниципалитета от 2023 года [2] – стратегический документ с горизонтом планирования в 20–25 лет. Документ предлагает переход от экстенсивного развития к развитию освоенных территорий, приоритет отдан внутреннему развитию существующих урбанизированных территорий, повышению функциональной смешанности, обеспечению постоянного населения жильём и совершенствованию мультимодальной транспортной доступности. Особенностью подхода является интеграция туристической инфраструктуры в городскую систему с учётом сезонных колебаний нагрузки. Сформулированы основные стратегические установки: Давос как привлекательное место проживания и работы – развитие доступного жилья, повышение качества городской среды, сохранение индивидуального характера малых поселений; Давос как международный центр туризма, науки и здравоохранения – поддержка конгрессной деятельности, исследовательских и медицинских учреждений, круглогодичного туризма и местного бизнеса; Давос как альпийский ландшафт – сохранение природных и культурных ландшафтов при развитии рекреационной инфраструктуры.

Crans-Montana - высокогорный курорт, сформировавшийся на основе традиционных альпийских поселений. В начале XX века развитие туризма и строительство гостиниц положили начало формированию двух курортных центров, постепенно объединённых застройкой. Во второй половине XX века развитие горнолыжной инфраструктуры обусловило интенсивную урбанизацию и формирование многофункциональной курортной среды с преобладанием гостиничной, апартаментной и рекреационной застройки. Современная планировочная структура характеризуется линейно-полицентрической организацией, концентрацией общественно-коммерческих функций в курортных ядрах и сохранением природно-ландшафтного окружения. Это полицентрический высокогорный курорт с линейно-дисперсной структурой, где урбанизированные ядра соединены в единую рекреационно-жилую систему, встроенную в рекреационный ландшафт и дополненную

крупными спортивными и туристическими территориями. Система общественных пространств имеет полицентрический и ландшафтно-курортный характер и включает: центральные площадные пространства станционных ядер (мест прибытия), линейные пешеходные связи, озёрно-парковые пространства, семейно-досуговые зелёные пространства, спортивно-событийные пространства, пространства у подъёмников, локальные общественные пространства исторических поселковых ядер.

Межмуниципальная стратегия развития до 2030 года [3] рассматривает территорию как многофункциональный горный регион, который должен быть привлекательным для постоянного проживания, работы и туризма в течение всего года. Стратегия ориентирована на преодоление пространственной разобщённости, развитие транспортных связей, укрепление круглогодичных городских функций, диверсификацию экономики и сохранение природного потенциала региона. Главное пространственное решение — усилить связность курортных центров и их взаимодействие с долиной, одновременно улучшая пешеходную среду и развивая круглогодичные функции. Основные цели: снизить пространственную фрагментацию (дисперсию), остановить экстенсивный рост (расползание застройки), восстановление постоянного населения, решение проблемы «холодных койко-мест», решение проблемы внутригородского дорожного движения, парковок и связи между долиной и горным курортом, снижение зависимости экономики от туризма, сохранение характера альпийского поселения.

Kitzbühel – исторический альпийский город, в конце XIX — начале XX века развитие альпийского туризма и зимних видов спорта обусловило его трансформацию в международный горнолыжный курорт. Моноцентрический исторический курортный город долинно-склонового типа, в котором компактный средневековый исторический центр образует ядро, окружённое внутренним поясом плотной смешанной застройки, озеленёнными жилыми районами и периферийными сельской застройкой. Город сочетает черты исторического малого города и альпийского курорта, где туристическая функция интегрирована в городскую ткань. В историческом центре преобладает компактный квартально-периметральный морфотип с плотным фронтом улиц, небольшими земельными участками и традиционной мало- и среднеэтажной застройкой с высокой концентрацией торговли, услуг, гостиниц и общественных функций. Пространственная организация характеризуется сочетанием компактного исторического общественного ядра и рассредоточенной сети рекреационных пространств, ориентированных на круглогодичное туристическое использование. Общественные пространства формируют систему пешеходных улиц, исторических площадей и рекреационно-ландшафтных территорий. Основным общественным ядром выступает исторический центр с площадью и улицей, где концентрируются торговые, культурные, ресторанные и туристические функции. Периферийные общественные пространства представлены прогулочными маршрутами, озеленёнными территориями и зонами отдыха, обеспечивающими связь городской застройки с окружающим альпийским ландшафтом.

Концепция пространственного развития [4] утверждает смешанное использование земель как один из важнейших принципов территориального планирования. Основные принципы, отражённые в документе: Компактное пространственное развитие - использование существующих земельных резервов, умеренное уплотнение застройки

и ограничение расширения границ; Сохранение природного и культурного ландшафта; Доступное жильё для постоянного населения - создание условий для проживания молодёжи и местных жителей; Сохранение исторического городского ядра – защита архитектурного облика старого города, сохранение общественных пространств и функционального разнообразия; Укрепление многофункциональной экономики; Улучшение транспортной связности – снижение транзитной нагрузки, развитие пешеходных и велосипедных связей, улучшение общественного транспорта; Развитие общественной инфраструктуры – поддержание доступности образовательных, социальных, медицинских и рекреационных объектов.

Таблица 2. Пространственно-функциональные характеристики альпийских курортов

Наименование	**Планировочная структура**	**Морфогенез**	**Текущая модель развития**	**Морфология**	**Коэффициент плотности застройки (диапазон)**
Zermatt	Моноцентрическая компактная линейно - узловая	Адаптивная трансформация сельского поселения	Интенсификация и регенерация застройки с сохранением историко-ландшафтной структуры		0,6-1,8
Davos	Полицентричная линейно-узловая	Трансформация и интеграция Курорта в системы сельских поселений	Интенсификация и функционально пространственная регенерация центров		0,35-1,7
Crans-Montana	Полицентричная линейно - узловая	Трансформация и интеграция Курорта в системы сельских поселений	урбанизация пространственная консолидация	Туристические кластеры	0,3-1,0
Kitzbühel	Моноцентрическая компактно-радиальная	Адаптивная трансформация шахтёрского города	Интенсификация с сохранением историко-планировочного ядра		0,3-1,5

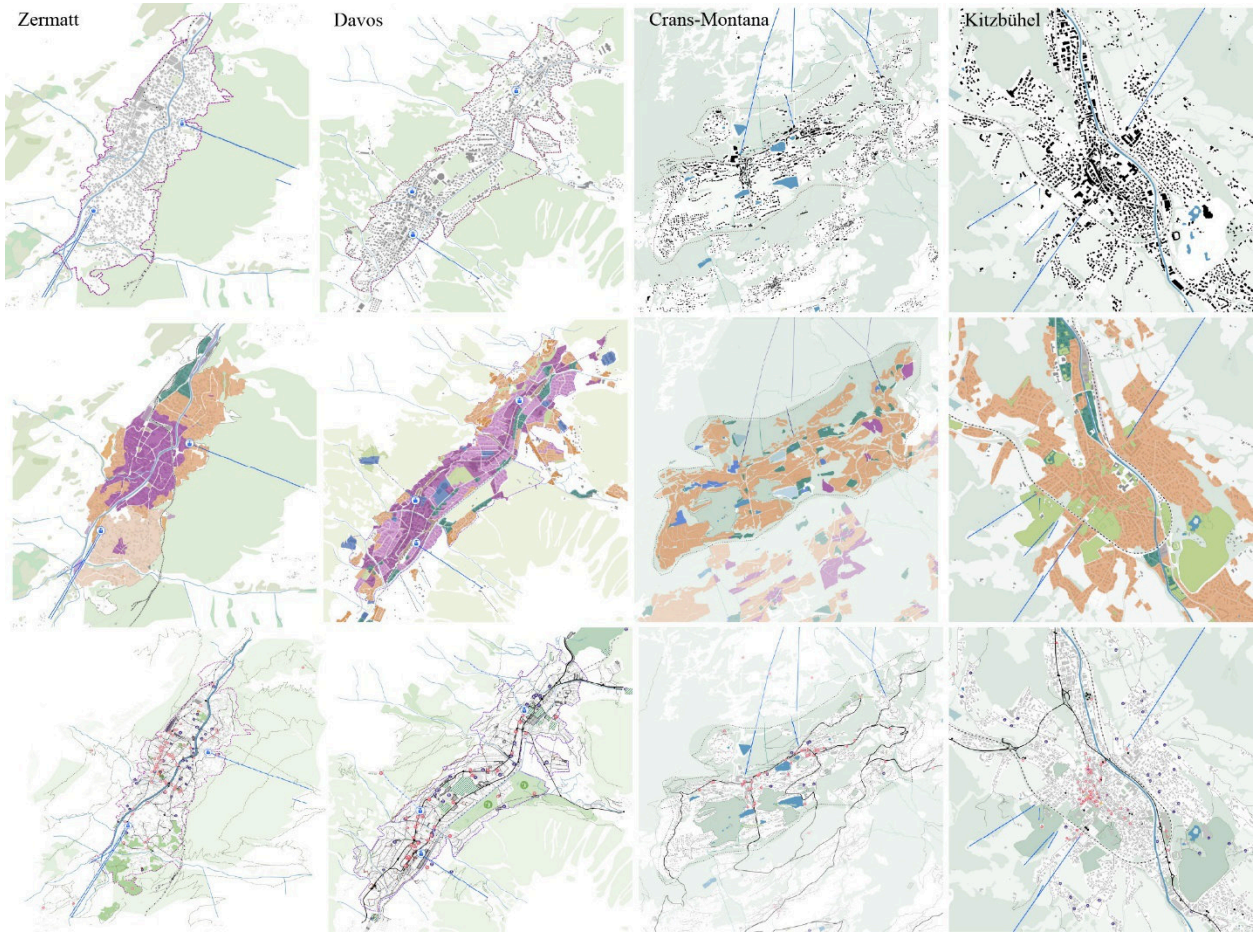


Рисунок 1. Туристские поселения Северной Америки

Североамериканская модель основана на планируемом освоении территории, отличается низкой плотностью, пространственной дисперсией и высокой зависимостью от автомобильного транспорта. Курорты демонстрируют более равномерное распределение плотности и меньшую концентрацию застройки, формируя дисперсную модель пространственного развития с концентрацией в туристических ядрах (центрах).

Таблица 3. Основные характеристики

Наименование	**Постоянное население чел.**	**Кол-во мест раз-я чел.**	**Площадь освоенной тер-и км^2**	**Плотность (морфологическая) чел./км^2**	**Плотность (пиковая) чел./км^2**
Aspen	6 489	10 000	10	650	1500
Breckenridge	5015	20 000	8,9	570	2400
Park City	8 587	23 500	11,63	740	2350
Vail	4 613	10 000	5,5	840	2300
Whistler	16 041	32 000	11,34	1400	3700

Aspen - курортный город долинного типа с компактным регулярным ядром, сформированным как шахтёрское поселение и позднее адаптированным под международный горнолыжный курорт в котором курортная инфраструктура интегрирована в городскую ткань. Морфология сочетает плотное историческое ядро с главной улицей как репрезентативной исторической осью, пешеходный центр и жилые кварталы, переходящие

к горным склонам. Историческое ядро основано на регулярной сетке с плотной квартальной застройкой, минимальными отступами, активными (коммерческими) первыми этажами. Главная улица как историко-репрезентативная ось, где сильна роль сохранённой застройки и образа города.

Согласно комплексному стратегическому плану пространственного и социально-экономического развития [5], важнейший пространственный принцип — сдерживание территориального разрастания за счёт установленной границы городского роста, концентрация городской плотности в центральной части с поддержанием многофункциональности центрального ядра и сохранение окружающих долин, склонов и природных пространств основывается на модели управляемого компактного развития, при которой пространственная концентрация городской активности сочетается с жёстким ограничением периферийной урбанизации. Основные принципы: Управляемый и ограниченный рост; Централизация плотности и сохранение масштаба города - концентрация наиболее интенсивной застройки в коммерческом ядре, ограничение высоты и объёмов зданий; Функциональная сбалансированность – сохранение торговли и услуг для местных жителей, гостиниц разных ценовых категорий, общественных учреждений и рабочих мест; Приоритет постоянного населения – развитие доступного жилья для работников и жителей; Полицентричная организация периферийного коридора – формирование отдельных функциональных узлов вдоль транспортного коридора; Транспортное развитие без роста автомобильной зависимости – интеграция общественного транспорта, пешеходных и велосипедных маршрутов, регулирование парковок; Сохранение природно-рекреационного каркаса – защита горных ландшафтов, рек, природных территорий, парков и сети троп, обеспечение доступной рекреации; Сохранение архитектурной идентичности – защита исторических зданий, приспособление их к современному использованию.

Breckenridge – исторический малый шахтёрский город, трансформированный во всесезонный курорт. Линейно-узловая (долинная) планировка, сформированная вдоль оси реки и транспортного коридора, обеспечивает иерархию связей. Сочетание исторически сложившегося компактного центра с квартальной ортогональной структурой, где основная улица выполняет роль доминирующего общественного функционального линейного ядра и современных рекреационных кластеров, а зоны подъемников формируют систему вторичных узлов. Морфологическая структура формируется сочетанием исторической городской ткани и курортной застройки, адаптированной к рельефу. Функционально-пространственная система города демонстрирует градиент урбанизации: от плотной, многофункциональной и пешеходной среды центра к разреженной жилой застройке на склонах.

В соответствии с планом территориального развития [6], территориальное развитие утверждается как процесс управляемого роста, при котором сохранение исторического облика города, природного ландшафта и качества жизни постоянного населения имеет приоритет перед максимальным наращиванием объёмов застройки. Основные принципы: Компактное развитие - концентрация наиболее интенсивной застройки в центре; Ограничение общего объёма развития – сокращение потенциального объёма будущей застройки и предотвращение неконтролируемого увеличения плотности; Функциональная

концентрация и смешанное использование -развитие многофункционального пешеходного центра при сохранении специализированных зон обслуживания и производства; Сохранение природно-ландшафтного каркаса - защита горных склонов, лесов, экологических коридоров; Поддержка постоянного населения – развитие доступного жилья для работающих жителей и повышение доли постоянно обитаемого жилищного фонда; Мультимодальная транспортная система – приоритет общественного транспорта, пешеходной и велосипедной связности, интеграция транспортной системы города и курорта; Сохранение исторической идентичности – защита исторического центра, контроль объёмов новой застройки; Развитие круглогодичной рекреации – разнообразие зимних и летних видов отдыха.

Park City - горный курортный город с полицентрической, линейно-узловой планировочной структурой и линейным историческим ядром. Характеризуется сочетанием исторического линейного центра, нескольких специализированных курортных узлов и распределённых жилых районов. Общегородской исторический центр: главная улица, концентрирующий торговлю, культуру, общественное питание и туристические услуги. Специализированные курортные узлы, организованные вокруг горнолыжных баз.

Согласно утвержденному генеральному плану [7], развитие территории переходит к модели компактного полицентричного развития, основанной на системе многофункциональных узлов, интегрированных с общественным транспортом, основанная на принципах управляемого компактного и полицентричного развития, предусматривающего концентрацию нового строительства в многофункциональных узлах, интегрированных с системой общественного транспорта. Ключевыми приоритетами выступают внутреннее развитие существующих урбанизированных территорий, функциональное смешение, обеспечение жильём постоянного населения и работников туристической отрасли, сохранение исторической идентичности и защита природно-ландшафтного каркаса.

Vail — исторический горнолыжный курорт, спроектированный и построенный во второй половине XX века на основе принципов альпийской архитектуры. Представляет собой линейно-узловую полицентрическую систему, сформированную вдоль долины и транспортного коридора, с чёткой привязкой к горнолыжной инфраструктуре. Два главных центра (ядра): историческое пешеходное туристическое ядро с высокой плотностью функций и общественных пространств и вторичное, более современное ядро с более масштабной застройкой. Оба узла имеют сильную интеграцию с подъёмниками. Узлы плотности полностью формируют компактные пешеходные пространства.

В соответствии с документами пространственного развития [8], [9], главный принцип: концентрация многофункциональной городской и туристической застройки в системе взаимосвязанных центров горной долины при ограничении периферийной застройки и сохранении природно-ландшафтного каркаса. Основные принципы: Управляемое компактное развитие – освоение внутренних резервов застроенной территории; Линейно-полицентричная организация -формирование нескольких взаимосвязанных функциональных центров вдоль долины; Концентрация интенсивной и смешанной застройки - размещение гостиниц, торговли, общественных функций, услуг и жилья преимущественно в центральных узлах; Дифференциация плотности застройки - более высокая интенсивность в центральных районах и ограниченная малоэтажная застройка на периферии и горных склонах; Сохранение природно-ландшафтного каркаса; Развитие круглогодичного туристического комплекса;

Поддержка постоянного проживания – развитие и сохранение доступного жилья для работников, обеспечение разнообразия жилых типов и повседневных услуг; Пешеходная и транспортная интеграция функциональных центров - укрепление связей между курортными ядрами, развитие общественного транспорта, пешеходных маршрутов и системы доступа к подъёмникам; Сохранение архитектурно-пространственной идентичности – контроль масштаба, характера и качества новой застройки, поддержание традиционной атмосферы альпийского курортного поселения.

Whistler – спроектированный во второй половине XX века курорт, с характерной линейно-узловой планировочной структурой, сформированной в условиях узкой горной долины. Центральным ядром стала пешеходная деревня, объединяющая общественно-деловые, гостиничные, торговые и рекреационные функции. Районы разделены зелёными буферами и имеют связи с локальными центрами обслуживания. Пешеходное многофункциональное ядро с ограниченным автомобильным движением внутри со смешанной туристической, жилой и коммерческой застройкой у нижней станции горнолыжного подъёмника. Жилая менее плотная зона представлена преимущественно индивидуальной и малоэтажной жилой застройкой, местами таунхаусы и многоквартирные комплексы.

Официальный план развития [10] основывается на модели управляемого роста в пределах ограниченного коридора урбанизации при контроле туристической ёмкости, сохранении природного каркаса и сбалансированном развитии курортной и жилой функций. Основные принципы: Контролируемое развитие в установленных пространственных границах; Регулирование общей ёмкости курорта – контроль жилищной и туристической ёмкости через оценку допустимой нагрузки на инфраструктуру; Компактная дискретная структура расселения - сохранение отдельных жилых и туристических районов, разделённых зелёными пространствами; Преимущественное использование существующего потенциала застройки - оптимизация освоенных земель, реконструкция и рациональное использование уже разрешённого строительства; Многофункциональность центральных территорий – сочетание гостиниц, жилья, торговли, общественных пространств и повседневных услуг в ключевых центрах; Приоритет жилья для работников курорта - развитие доступного жилья; Пешеходно-ориентированная организация курортных центров - сохранение пешеходного характера центров и развитие общественного транспорта; Сохранение экологического и ландшафтного каркаса; Баланс круглогодичного туризма и повседневной жизни.

Таблица 4. Пространственно-функциональные характеристики туристских поселений Северной Америки

Наименование	**Планировочная структура**	**Морфогенез**	**Модель развития**	**Морфология**	**Коэффициент плотности застройки (диапазон)**
Aspen	Моноцентрическая линейно-узловая	Адаптивная трансформация шахтёрского города	Интенсификация, функциональная конверсия, регенерация	Интеграция городского и туристического ядра	0,3-2,2

Наименование	Планировочная структура	Морфогенез	Модель развития	Морфология	Коэффициент плотности застройки (диапазон)
Breckenridge	Моноцентрическая Линейно-узловая	Адаптивная трансформация шахтёрского города	Интенсификация, функциональная конверсия	Сочетание исторической застройки и туристических комплексов	0,05-0,4
Park City	Полицентрическая Кластерная	Адаптивная трансформация шахтёрского города	Интенсификация Функциональная конверсия, регенерация	Пространственное разделение жилых, общественных и туристических кластеров	1,0-2,0
Vail	Полицентричная Линейно-кластерная	Спроектированный курорт	Интенсификация, регенерация	Туристические многофункциональные кластеры	0,3-2,5
Whistler	Полицентричная Линейно-кластерная	Спроектированный курорт	Консолидация реконструкция регенерация	Туристические многофункциональные кластеры	0,25-0,85

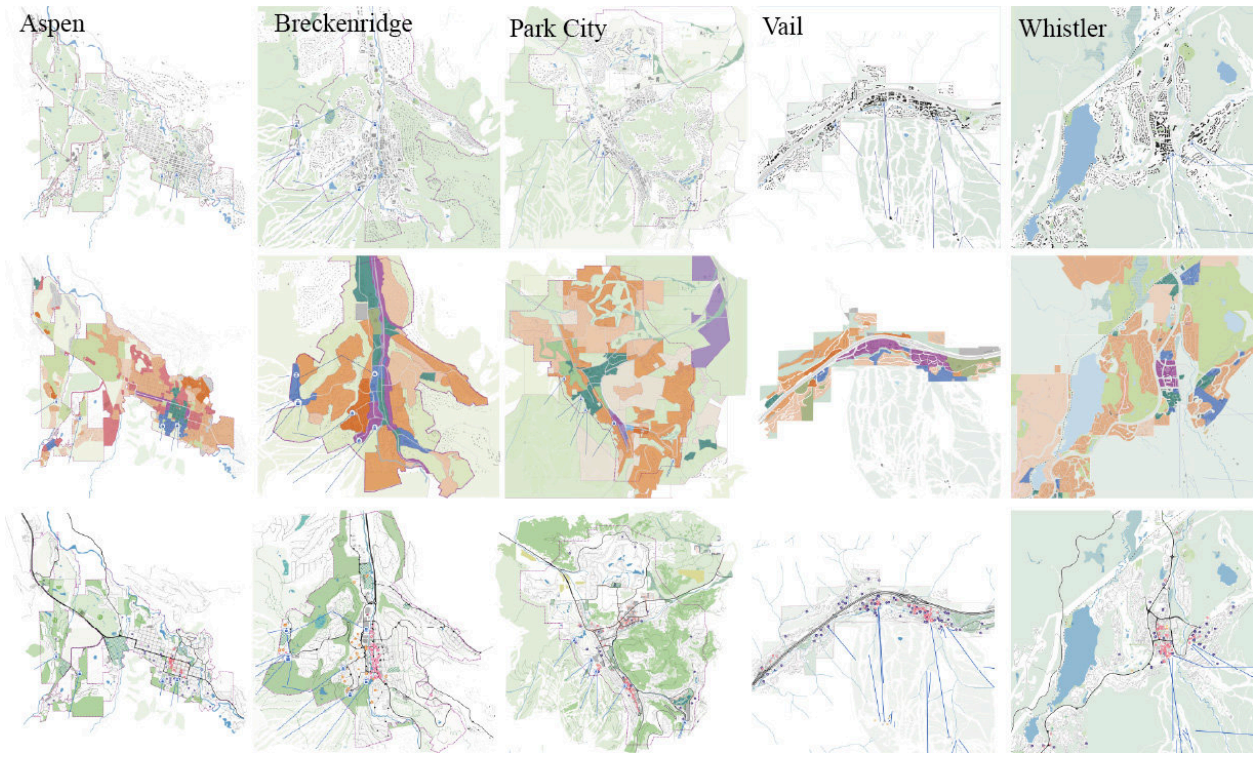


Рисунок 2. Результаты

Сравнительный анализ показывает, что альпийская модель характеризуется высокой плотностью застроенной территории и экстремальной сезонной нагрузкой. В свою очередь североамериканская модель демонстрирует более низкую плотность и пространственную дисперсию, что отражает зависимость от автомобильной инфраструктуры и иные принципы освоения территории. Анализ показал, что плотность застройки в альпийских курортах концентрируется в пределах компактного ядра, тогда как в североамериканских курортах

чаще наблюдается линейно-дисперсная структура расселения. Различия в плотности обусловлены не только планировкой, но и типологией застройки: преобладание индивидуального жилья в Северной Америке приводит к снижению плотности, тогда как альпийские курорты используют более компактные морфотипы жилья.

На основании совокупности морфологических сопоставлений и планировочных документов сформулированы семь взаимосвязанных градостроительных принципов. Они представлены в таблице как аналитическое обобщение изученных практик.

Таблица 5. Градостроительные принципы пространственного развития туристских поселений — горнолыжных курортов

Принцип	Основной механизм пространственной реализации
Контроль пространственных границ роста	Приоритет уплотнительной застройки внутри существующих границ, ограничение застройки склонов и природных земель.
Полицентричность Полифункциональность	Развитие системы взаимосвязанных центров, создание интегрированных городских пространств.
Дифференцированная плотность и регенерация	Приоритет интенсивной застройки в центрах и транспортных узлах, снижение плотности к периферии, сохранение исторического масштаба.
Непрерывный природно-ландшафтный каркас	Защита склонов и экологических связей, сохранение и развитие зеленого каркаса.
Развитие мультимодальных транспортных систем и узлов	Развитие связей пешеходных ядер с подъёмниками, транзитными узлами и пешеходными маршрутами, снижение потребности в частном автомобиле.
Баланс постоянного, туристического и служебного жилья	Сохранение постоянного фонда жилья для постоянных жителей, работников и контроль второго жилья.
Управление курортной ёмкостью и адаптивностью	Согласование объёма турпотока и мест размещения с инфраструктурой, развитие круглогодичных сопутствующих функций и экологически ответственная модернизация.

Полученные результаты позволяют предложить концептуально-параметрическую модель пространственного развития курортного поселения. Её исходным условием является определение границы фактически освоенной территории и допустимого коридора будущего развития. Далее устанавливаются: морфологическая плотность населения, условная пиковая плотность, пространственная концентрация многофункциональных центров, градиент плотности и интенсивности застройки, доля и связность природных пространств, доступность центров и канатных станций предпочтительными видами транспорта, обеспеченность постоянным и служебным жильём, допустимая ёмкость территории.

Заключение

Таким образом, основной результат исследования состоит в выявлении общей тенденции перехода от экстенсивного освоения горных долин к управляемой пространственной консолидации — независимо от исторического происхождения поселения. Европейские примеры демонстрируют более высокую концентрацию постоянного населения на освоенной территории, североамериканские — разнообразие форм полицентричной организации и механизмов контроля роста. Их сопоставление позволяет рассматривать

приоритет внутреннего развития, функциональную смешанность, регулируемую ёмкость, жилищную сбалансированность, мультимодальную связанность и охрану ландшафта как элементы единой градостроительной стратегии.

Список литературы

1. Ortsplanungsrevision Zermatt: Informationsveranstaltung, September 2020 [Электронный ресурс] / Gemeinde Zermatt. – Zermatt. URL: https://cms.ewg-zermatt.ch/api/media/file/bau_infomationsveranstaltung_2020_09_ac63403c22.pdf. (дата обращения 28.11.2026)
2. Gemeinde Davos. Kommunales räumliches Leitbild (KrL): Schlussbericht vom 31. Januar 2023. – Davos [Электронный ресурс]. URL: https://www.gemeindedavos.ch/_docn/4530221/KrL_Davos_Schlussbericht_31.01.2023.pdf. (дата обращения 28.11.2026)
3. Association des communes de Crans-Montana. Stratégie de développement intercommunal 2030 (SDI): Plan de marketing territorial [Электронный ресурс]. – Crans-Montana: Association des communes de Crans-Montana. – 2020. URL: https://www.cransmontana.ch/media/il4j1ays/202101-sdi-crans-montana-2030.pdf. (дата обращения 28.11.2026)
4. Stadtgemeinde Kitzbühel. Fortschreibung des örtlichen Raumordnungskonzeptes: 2. Auflage. – Kitzbühel [Электронный ресурс]. – 2014. URL: https://www.kitzbuehel.at/Fortschreibung_Raumordnungskonzept_2_Auflage. (дата обращения 28.11.2026)
5. City of Aspen; Pitkin County. 2012 Aspen Area Community Plan [Электронный ресурс]. – Aspen. URL: https://aspen.gov/DocumentCenter/View/358. (дата обращения 28.11.2026)
6. Town of Breckenridge. Town of Breckenridge Comprehensive Plan [Электронный ресурс]. – Breckenridge, 2008. – Утверждён 25 марта Resolution, Series. – № 11. URL: https://www.townofbreckenridge.com/home/showpublisheddocument/25716/638796343212870000. (дата обращения 28.11.2026)
7. Park City Municipal Corporation. Park City General Plan 2025 [Электронный ресурс]. – Park City, 2025. – Утверждён 25 сентября. URL: https://www.parkcity.gov/Documents/Services/Planning/General (дата обращения 28.11.2026) Plan/ParkCityGeneralPlan2025.pdf.
8. Town of Vail. Vail Mobility & Transportation Master Plan [Электронный ресурс]. – Vail, Colorado, USA. URL: https://www.vail.gov/home/showpublisheddocument/4444/638572500337170000. (дата обращения 28.11.2026)
9. Town of Vail. Land Use Plan: An Element of the Town of Vail Comprehensive Plan [Электронный ресурс]. – Vail: Town of Vail, 1986 (обновлён 28 января). – 2009. – 128 P. URL: https://www.vail.gov/home/showpublisheddocument/1806/637458709245900000. (дата обращения 28.11.2026)
10. Resort Municipality of Whistler. Official Community Plan: Schedule A to Official Community Plan Bylaw, 2018 [Электронный ресурс]. – Whistler: Resort Municipality of Whistler, 2018 (сводная редакция от 25 февраля). – 2026. – № 2199. – 389 P. URL: https://www.whistler.ca/wp-content/uploads/2026-02-26_Bylaw2199.pdf. (дата обращения 28.11.2026)
11. Pia F. Urbanizing the Alps: Densification Strategies for Mountain Villages [Электронный ресурс]. – Basel: Birkhäuser, 2019. – 239 P. – DOI: 10.1515/9783035617337. URL: https://doi.org/10.1515/9783035617337. (дата обращения 28.11.2026)

12. Pia F. Urbaniser les Alpes suisses: Stratégies de densification des villes en altitude [Электронный ресурс]: thèse de doctorat, – Lausanne: École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), 2016. – 485 P. – № 7167. – DOI: 10.5075/epfl-thesis-7167. URL: https://infoscience.epfl.ch/record/222788. (дата обращения 28.11.2026)
13. Autengruber P. et al. Masterprojekt: Raumplanerische Steuerung von Zweit- und Nebenwohnsitzen im alpinen Raum: Gesamtbericht Sommersemester 2024 [Электронный ресурс] / ред. A. Kanonier, B. Steinbrunner, A.F. Falch. – Wien: Technische Universität Wien, 2024. – 468 S. – DOI: 10.34726/6919. URL: https://doi.org/10.34726/6919. (дата обращения 28.11.2026)
14. Swiss Federal Office of Culture. The Davos Baukultur Quality System: Eight Criteria for a High-Quality Baukultur [Электронный ресурс]. – Bern: Swiss Federal Office of Culture. – 2021. – 36 P. URL: https://www.bak.admin.ch/dam/en/sd-web/zHoSohdLoRNG/davos_baukultur_kurzbroschure.pdf. (дата обращения 28.11.2026)
15. Delorme F. Du village-station à la station-village. Un siècle d'urbanisme en montagne // In Situ. – 2014. – № 24. – DOI: 10.4000/insitu.11243.
16. Gill A. From growth machine to growth management: the dynamics of resort development in Whistler, British Columbia // Environment and Planning A. – 2000. – T. 32, № 6. – P. 1083–1103. – DOI: 10.1068/a32160.
17. Gill A.M., Williams P.W. Managing growth in mountain tourism communities // Tourism Management. – 1994. – T. 15, № 3. – P. 212–220. – DOI: 10.1016/0261–5177(94)90107-4.
18. Steiger R., Scott D., Abegg B., Pons M., Aall C. A critical review of climate change risk for ski tourism // Current Issues in Tourism. – 2019. – T. 22, № 11. – P. 1343–1379. – DOI: 10.1080/13683500.2017.1410110.
19. Gerber J.-D., Bandi Tanner M. The role of Alpine development regimes in the development of second homes: preliminary lessons from Switzerland // Land Use Policy. – 2018. – T. 77. – P. 859–870. – DOI: 10.1016/j.landusepol.2017.09.017.

Статья поступила в редакцию: 23.10.2026
Статья принята к публикации: 05.11.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 631.67+621.67+621.314

Анализ влияния частотного преобразователя на гидравлические режимы работы насосного агрегата D320/50 при орошении

Парпиев Сайфиддин Фазлиддинович
докторант (PhD)
Андижанский государственный технический институт
Республика Узбекистан, г. Андижан
Уринов Искандар Шухратбек угли
докторант
Научно-исследовательский институт ирригации и водных проблем
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Сайлиев Одилжон Ихтиёр угли
независимый исследователь, Научно-исследовательский институт ирригации и водных проблем
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Ботирова Нигора Махаммаджон кизи
докторант
Научно-исследовательского института ирригации и водных проблем, Узбекистан, Ташкент
Шакиров Бобур Мирзо Бахтияр угли докторант, Андижанский государственный технический институт
Республика Узбекистан, г. Андижан
E-mail: boburmirzo.shakirov@gmail.com

Analysis of the influence of a frequency converter on the hydraulic operating modes of the D320/50 pump unit during irrigation

Parpiyev Sayfiddin Fazliddinovich
Doctoral candidate (PhD)
Andijan State Technical Institute
Uzbekistan, Andijan
Urinov Iskandar Shukhratbek ugli
PhD Student
Research Institute of Irrigation and Water Problems
Republic of Uzbekistan, Tashkent
Sayliyev Odiljon Ikhtiyor ugli
Independent Researcher
Research Institute of Irrigation and Water Problems
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Библиографическое описание: Анализ влияния частотного преобразователя на гидравлические режимы работы насосного агрегата D320/50 при орошении // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Парпиев С.Ф. [и др.]. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23679

Botirova Nigora Makhammadjon qizi
PhD Student
Research Institute of Irrigation and Water Problems
Republic of Uzbekistan, Tashkent
Shakirov Bobur Mirzo Bakhtiyar ugli
PhD Student
Andijan State Technical Institute
Uzbekistan, Andijan

Аннотация

В статье исследуются гидравлические и энергетические характеристики центробежного насосного агрегата D320/50, используемого для полива по бороздам миндальных насаждений возрастом 3–4 года на площади 52 га в условиях чернозёмных почв. Цель исследования заключается в определении рационального режима работы насосного агрегата при регулировании частоты вращения электродвигателя с помощью частотного преобразователя. В качестве основного режима рассматривается работа насоса при частоте вращения 1400 об/мин, соответствующей частоте питания 46,67 Гц. Исследованы изменения напора, расхода воды, скорости потока, потребляемой мощности и электрического тока при изменении режима работы насосного оборудования. Теоретические параметры сопоставлены с фактическими результатами измерений, полученными в условиях эксплуатации оросительной системы. Расчётный напор составляет 43,55 м, тогда как фактический напор находится в пределах 38,0–40,5 м. Фактический расход воды составляет 270–285 м³/ч. Различия между расчётными и измеренными значениями обусловлены гидравлическими сопротивлениями трубопроводной сети и местными потерями напора. Рассмотрено влияние регулирования частоты вращения на энергетическую эффективность насосного агрегата и рациональное распределение воды при бороздовом поливе. Полученные результаты показывают, что применение частотного преобразователя позволяет адаптировать рабочие параметры насосного оборудования к требованиям оросительной системы. Согласно результатам исследования, потенциальная экономия электроэнергии может достигать 20–25 % по сравнению с традиционным режимом эксплуатации. Практическая значимость работы заключается в возможности использования полученных результатов при выборе режимов работы насосных агрегатов на оросительных системах.

Abstract

This study investigates the hydraulic and energy performance of a D320/50 centrifugal pump unit used for furrow irrigation of 3–4 years old almond trees across a 52-hectare area with black soil. The main objective is to determine an appropriate operating mode for the pumping unit by adjusting the electric motor speed with a frequency converter. Particular attention is given to operation at a rotational speed of 1,400 rpm, corresponding to a supply frequency of 46.67 Hz. The study examines changes in pump head, water discharge, flow velocity, electrical current, and power consumption under the selected operating conditions. Theoretical parameters are compared with measurements obtained during the operation of the irrigation system. The calculated pump head is 43.55 m, whereas the measured head ranges from 38.0 to 40.5 m. The actual water discharge is between 270 and 285 m³/h. These differences are associated with friction losses and local hydraulic resistances within the pipeline network. The influence of rotational speed regulation on energy

consumption and water distribution during furrow irrigation is also considered. The results indicate that a frequency converter can help adapt pump performance to the hydraulic requirements of the irrigation network and the water demand of the irrigated area. The estimated potential electricity savings reach 20–25 % compared with the conventional operating mode. The practical significance of the research lies in its application to selecting operating parameters for irrigation pumping stations, reducing unnecessary energy consumption, and improving the efficiency of water delivery. The findings may be useful for evaluating variable-speed pump operation under similar hydraulic and agricultural conditions.

Ключевые слова: центробежный насос, частотный преобразователь, частота вращения, напор, расход воды, гидравлические потери, энергоэффективность.

Keywords: centrifugal pump, frequency converter, rotational speed, pump head, water discharge, hydraulic losses, energy efficiency.

Введение

Рациональное использование водных и энергетических ресурсов в мировом масштабе, повышение гидравлической эффективности оросительных систем и снижение энергопотребления насосных станций относятся к числу актуальных научных и практических задач. В условиях Узбекистана традиционные методы орошения плодовых насаждений, в частности миндальных садов, сопровождаются повышенным давлением в трубопроводах и потерями воды. Корневая система молодых миндальных деревьев в возрасте 3–4 лет находится на стадии активного развития (глубина 0–60 см), поэтому при их орошении необходимо строго контролировать скорость потока воды и напор в начале каждой борозды. Эксплуатация традиционных насосных агрегатов при постоянной номинальной частоте 50 Гц и регулирование расхода воды посредством задвижек приводят к возникновению дополнительных гидравлических сопротивлений и могут способствовать развитию кавитационных процессов. Одним из наиболее перспективных решений данной проблемы является управление рабочей точкой насосного агрегата с помощью частотного преобразователя в соответствии с потребностями почвы и сельскохозяйственных культур.

Цель настоящего исследования заключается в определении и научном обосновании фактических гидравлических и энергетических параметров при снижении частоты вращения двигателя насоса D320/50 до 1400 об/мин в процессе полива по бороздам миндальных насаждений, произрастающих на чернозёмных почвах. Исследование также опирается на предыдущие работы автора, посвящённые распределению скоростей потока в трубопроводах и местным гидравлическим сопротивлениям [10].

Методы

В качестве объекта исследования были выбраны миндальные насаждения в возрасте 3 – 4 лет на площади 52 га и обеспечивающий их водоснабжение центробежный насосный агрегат марки D320/50 (номинальные характеристики: $Q_1 = 320$ м^3/час,

$H_1 = 50$м, $n_1 = 1500$об/мин, мощность двигателя 75 кВт, номинальный ток $I_1 = 145A$). Управление оросительной системой осуществлялось с помощью панели частотного преобразователя, работающей на основе скалярного принципа управления ($V/f = const$) [6].

Согласно законам гидравлического подобия насосов, при изменении частоты вращения ($n_1 = 1400$об/мин) рабочая частота (f), напор (H_2) и расход воды (Q_2) рассчитывались с использованием следующих фундаментальных уравнений:

$$f = \frac{n_2 p}{120} = \frac{1400 \cdot 4}{120} = 46{,}67Hz \quad (1)$$

$$H_2 = H_1 \cdot \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 = 50 \cdot \left(\frac{1400}{1500}\right)^2 \quad (2)$$

$$Q_2 = Q_1 \cdot \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 = 320 \cdot \left(\frac{1400}{1500}\right)^2 \quad (3)$$

Результаты

Порядок проведения натурных экспериментов был следующим: с помощью частотного преобразователя изменяли частоту переменного тока и, соответственно, частоту вращения вала насоса. При каждом значении частоты вращения вала насоса измеряли параметры потребления электроэнергии, а именно напряжение, силу тока и мощность электродвигателя. Измерения электрических параметров проводились в различных фазах при определённом значении частоты вращения вала рабочего колеса насоса. Полученные значения мощности использовались для анализа влияния изменения частоты вращения приводного вала на коэффициент полезного действия (КПД) электропривода, включающего электродвигатель и частотный преобразователь.

Для количественного определения зависимости КПД насоса от частоты вращения был проведён регрессионный анализ на основе метода наименьших квадратов. Среди рассмотренных линейных и полиномиальных регрессионных моделей была выбрана наиболее оптимальная модель на основе критериев оценки качества аппроксимации. При этом учитывались коэффициент детерминации (R^2), скорректированный коэффициент детерминации (Adjusted R^2) и среднеквадратичная ошибка (RMSE).

Общая адекватность модели проверялась посредством анализа остатков и с использованием F-критерия Фишера. Обработка данных и регрессионный анализ выполнялись в программе MS Excel. Полученные зависимости использовались для комплексной оценки энергетической и водной эффективности оросительной насосной станции. Подход к нормализации, основанный на относительном КПД и соотношении частот вращения, позволяет распространить полученные результаты на насосные системы, работающие в аналогичных условиях [3].

В результате лабораторных экспериментов были получены зависимости изменения параметров насосного агрегата, а именно напора, расхода воды, потребляемой мощности и коэффициента полезного действия, от частоты вращения вала. Все показатели эффективности анализировались в относительной (безразмерной) форме по отношению к значениям, соответствующим номинальной частоте вращения и максимальному КПД.

Изменения различных составляющих КПД насоса при отклонении частоты вращения вала от номинального значения были представлены в виде графиков. На рисунке 1 показаны относительные изменения объёмного и гидравлического КПД при снижении частоты вращения вала. На рисунке 2 представлены относительные изменения механического КПД и общего КПД насоса.

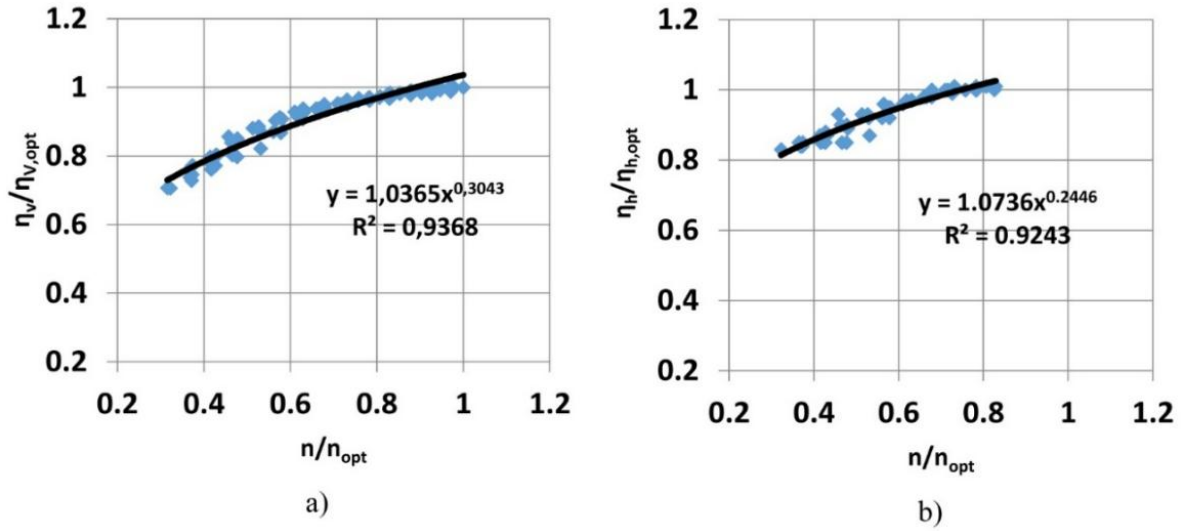


Рисунок 1. Относительное изменение объёмного и гидравлического КПД при снижении частоты вращения вала

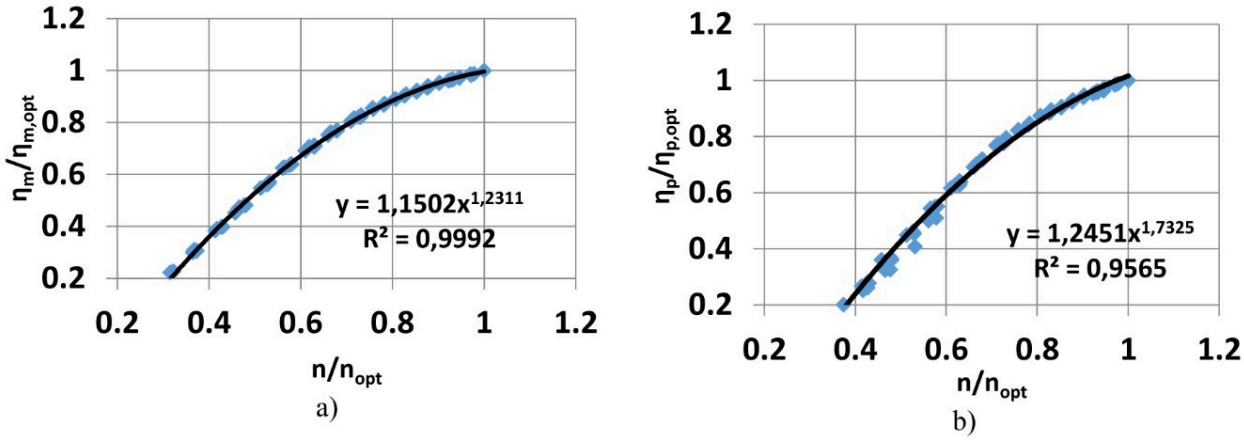


Рисунок 2. Относительное изменение механического и общего КПД насоса

В результате статистической обработки данных лабораторных экспериментов были определены эмпирические зависимости, характеризующие изменение отдельных составляющих коэффициента полезного действия (КПД) в зависимости от частоты вращения вала [7].

Таблица 1. Краткий сравнительный анализ теоретических и фактических рабочих параметров, полученных при настройке частоты вращения двигателя на 1400 об/мин (46,67 Гц), представлен в таблице 2.

Наименование рабочего параметра	Обозначение	Теоретическое значение	Измеренное значение	Единица измерения
Скорость вращения	n	1400	1450	об/мин
Рабочая частота	f	46,67	46,67	Гц

Наименование рабочего параметра	Обозначение	Теоретическое значение	Измеренное значение	Единица измерения
Напряжение	U	354,7	350-355	В
Сила тока	I	145	105-115	А
Напор	H	43,55	38-40,5	м
Расход воды	Q	298,6	270-285	м3/ч
Скорость потока	V	1,1	0,95-1,05	м/с

Таблица 2. Параметры насосного агрегата D320/50 при частоте вращения 1400 об/мин

№	Марка насоса	Диаметр рабочего колеса D, мм	исло оборотов n, мин	Параметры насоса	Электрические измерения	Насоснинг ишчи зонаси			
						Начальная	Рабочая точка насоса	Конечная	Рекомендуемый двигатель Р, кВт
1	Д320-50	405	1450	Q	м3/ч	229	320	400	75
				H	м	52	50	43	
				N	кВт	60	60	70	
				n	%	76	72	67	
				I	A	130	120	100	
				V	м/с	3,5	3	2,5	

Таблица 3. Пуск насоса с помощью частотного преобразователя.

№	Насос макаси	Диаметр ишчи ғилдирак Д, мм	Айланишлар сони n, мин	Насос параметрлари	Электр ўлчовлари	Насоснинг ишчи зонаси			
						Бошланғич	Насоснинг ишлаш нуқтаси	охири	Тавсия этилган двигател Р. кВт
1	Д320-50	405	1450	Q	м3/ч	214,4	284	364	75
				H	мр	51	48	41	
				N	кВт	55	55	65	
				n	%	60	63	70	
				I	A	120	110	95	

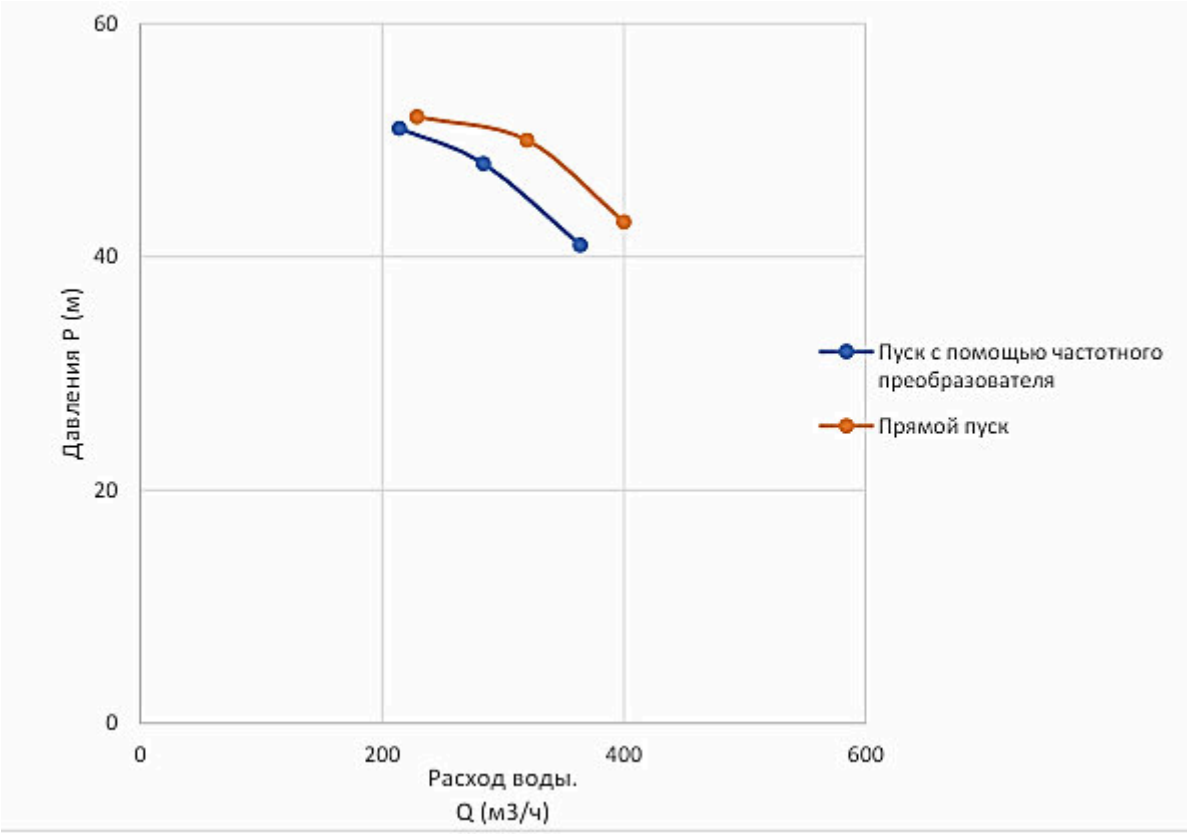


Рисунок 3. Изменение давления жидкости в зависимости от расхода

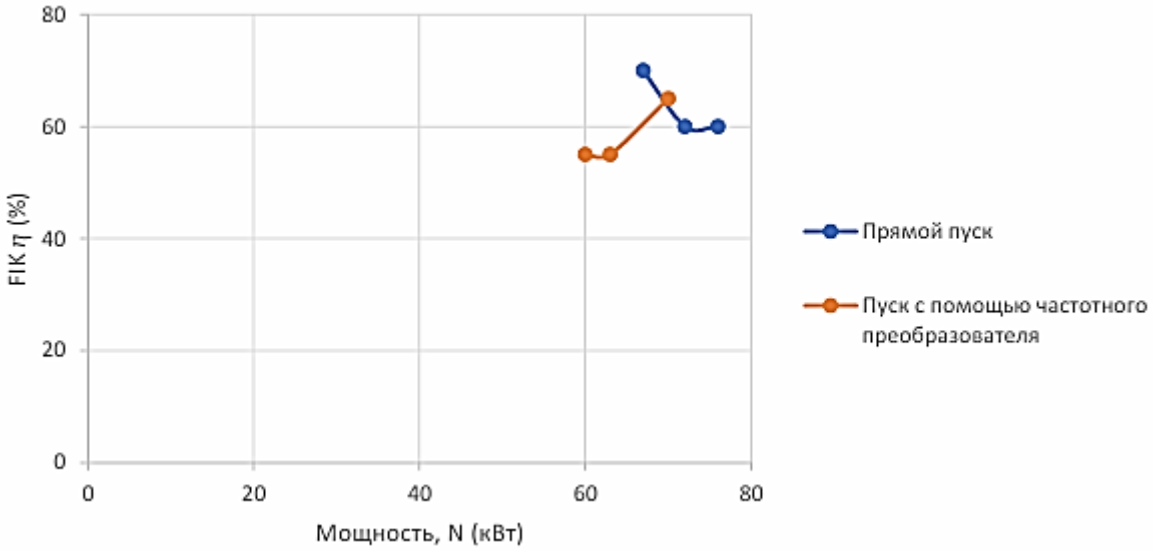


Рисунок 4. График зависимости КПД от мощности

Результаты экспериментов показали, что, несмотря на расчётное значение напора 43,55 м, в реальных условиях он снизился до 38,0–40,5 м вследствие линейных и местных потерь в трубопроводной системе. Фактический расход воды составил 270–285 м³/ч.

Рисунок 5. Общий вид насосной установки на объекте исследования (слева) и процесс настройки системы управления электродвигателем (справа)

Обсуждение

Полученные фактические гидравлические показатели соответствуют особенностям чернозёмных почв, на которых расположен миндальный сад площадью 52 га. Чернозём обладает высокой влагоёмкостью, а процесс впитывания воды в таких условиях протекает относительно медленно. Большой расход воды при номинальной частоте 50 Гц мог бы привести к образованию луж на поверхности почвы при подаче воды в борозды и вызвать почвенную эрозию.Фактический расход воды 270–285 м³/ч при частоте вращения 1400 об/мин обеспечивает равномерное и глубокое увлажнение почвы в соответствии с установленной нормой полива 500 м³/га для 3–4-летних миндальных насаждений, не допуская образования почвенной корки [9].

С энергетической точки зрения снижение частоты до 46,67 Гц в соответствии с законом кубической зависимости существенно уменьшило нагрузку на электродвигатель и позволило снизить силу тока в реальных условиях до 105–115 А. Это обеспечивает возможность экономии электроэнергии до 20–25 % в течение оросительного сезона [8].

Кроме того, благодаря отсутствию необходимости механического дросселирования потока задвижкой минимизируются местные гидравлические потери в трубопроводе, а риск возникновения гидравлических ударов при запуске системы существенно снижается [5].

Заключение

Управление насосным агрегатом D320/50 с помощью частотного преобразователя при частоте вращения 1400 об/мин (46,67 Гц) обеспечивает оптимальный гидравлический режим полива по бороздам молодых миндальных насаждений на чернозёмных почвах.

Фактический расход воды 270–285м³/ч и напор 38,0–40,5м, обусловленные сопротивлениями системы в реальных условиях эксплуатации, способствуют качественному увлажнению корневой системы без нерационального расходования воды.

По сравнению с традиционной системой управления данный режим позволяет повысить энергетическую эффективность на 20–25 %, а также увеличить срок эксплуатации насосного оборудования и трубопроводов.

Список литературы

1. Bordeasu D., Dragan F., Filip I., Szeidert I., Tirian G.O. Estimation of Centrifugal Pump Efficiency at Variable Frequency for Irrigation Systems. Sustainability. 2024., Article 4134. – T. 16, № 10. – DOI: 10.3390/su16104134.
2. Burt C.M., Piao X., Gaudi F., Busch B. Taufik. Electric Motor Efficiency Under Variable Frequencies and Loads // Journal of Irrigation and Drainage Engineering. – 2008. – T. 134, № 2. – P. 129–136. – DOI: 10.1061/(ASCE.
3. Gülich J.F. Centrifugal Pumps. 3rd ed. Berlin, Heidelberg: Springer. – 2014. – 1116 P. – DOI: 10.1007/978-3-642-40114-5.
4. Hanson B., Weigand C., Orloff S. Performance of Electric Irrigation Pumping Plants Using Variable Frequency Drives // Journal of Irrigation and Drainage Engineering. – 1996. – T. 122, № 3. – P. 179–182. – DOI: 10.1061/(ASCE.
5. International Electrotechnical Commission. IEC 61800-2: Adjustable Speed Electrical Power Drive Systems. Part 2: General Requirements – Rating Specifications for Low Voltage Adjustable Frequency AC Power Drive Systems. Geneva: IEC.
6. Kan E., Mukhammadiev M., Ikramov N., Majidov T. Full-scale testing of the pump unit with a frequency converter. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020., Article 012112. – T. 883, № 1. – DOI: 10.1088/1757-899X/883/1/012112.
7. Kan E., Mukhammadiev M., Ikramov N. Methods of regulating the work of units at irrigation pumping stations. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020., Article 042009. – T. 869, № 4. – DOI: 10.1088/1757-899X/869/4/042009.
8. Mohan N., Undeland T.M., Robbins W.P. Power Electronics: Converters, Applications, and Design. 3rd ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons. – 2003. – 802 P.
9. Stepanoff A.J. Centrifugal and Axial Flow Pumps: Theory, Design, and Application. 2nd ed. – New York: John Wiley & Sons, 1957.
10. Zagirnyak M., Korenkova T., Kovalchuk V. Szczęsny A., Korzeniewska E. The Analysis of Operation Modes of Variable Speed Pump Units with Different Circuits of Turbomachine Connection. Energies. 2024., Article 882. – T. 17, № 4. – DOI: 10.3390/en17040882.

Статья поступила в редакцию: 24.06.2026
Статья принята к публикации: 30.06.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 691.327.33.2

DOI: 10.32743/UniTech.2026.152.11.23137

Общие свойства газобетона на основе волластонита

Сатторов Зафар Мурадович
канд. техн. наук, проф.
кафедра Строительство и инженерия окружающей среды, Ташкентский архитектурно-строительный университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: mr.s.zafar@mail.ru

Отажонов Олмосбек Аскарали угли
PhD, ст. преп
кафедра Строительные материалы и изделия, Ферганский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Фергана
E-mail: olmosbekotajonov@gmail.com

General properties of aerated concrete based on wollastonite

Sattorov Zafar Muradovich
PhD in Engineering, Professor
Department of Construction and Environmental Engineering, Tashkent University of Architecture and Civil Engineering
Uzbekistan, Tashkent

Otajonov Olmosbek Askarali ugli
PhD in Engineering, Senior Lecturer
Department of Construction Materials and Products, Fergana State Technical University
Uzbekistan, Fergana

Аннотация

В статье рассмотрены общие физико-механические, структурные и технологические свойства газобетона, модифицированного волластонитом $CaSiO_3$. Анализ выполнен на основе представленных рентгенофазовых материалов по волластониту, цементу и золе ТЭС, а также с учетом пяти публикаций из международной научной базы Scopus, посвященных ячеистым бетонам, минеральным добавкам и волластонитсодержащим цементным системам. Показано, что волластонит может выполнять одновременно функции активного кальций-силикатного компонента, микродисперсного наполнителя, центра кристаллизации C-S-H-фаз

Библиографическое описание: Сатторов З.М., Отажонов О.А.У. Общие свойства газобетона на основе волластонита // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23137

и микроармирующего элемента стенок пор. Для газобетона это особенно важно, поскольку эксплуатационные характеристики материала определяются не только минералогическим составом, но и устойчивостью газовой пористой структуры.

По данным XRD, образец волластонита характеризуется интенсивным основным рефлексом в области 2θ≈29,5° и набором дополнительных пиков, соответствующих β-волластониту. Зола ТЭС содержит кварц, муллит и значительную аморфную алюмосиликатную фазу, что делает ее перспективным реакционно-способным кремнеземистым компонентом. Цементная матрица представлена преимущественно силикатными клинкерными фазами C_3S и C_2S, обеспечивающими раннее твердение и образование $Ca(OH)_2$. Совместное использование этих компонентов позволяет прогнозировать получение газобетона плотностью D500-D700 с повышенной стабильностью структуры, улучшенной трещиностойкостью и рациональным соотношением прочности и теплопроводности.

Abstract

The article examines the general physical-mechanical, structural, and technological properties of aerated concrete modified with wollastonite $CaSiO_3$. The analysis was carried out based on the presented X-ray phase analysis materials for wollastonite, cement, and thermal power plant ash, as well as taking into account five publications from the international Scopus scientific database devoted to cellular concretes, mineral additives, and wollastonite-containing cement systems. It is shown that wollastonite can simultaneously perform the functions of an active calcium silicate component, a microdispersed filler, a crystallization center for C-S-H phases, and a micro-reinforcing element of pore walls. This is especially important for aerated concrete, since the operational properties of the material are determined not only by its mineralogical composition but also by the stability of its porous gas-formed structure.

According to XRD data, the wollastonite sample is characterized by an intense main reflection in the region of 2θ≈29.5° and a set of additional peaks corresponding to β-wollastonite. Thermal power plant ash contains quartz, mullite, and a significant amorphous aluminosilicate phase, which makes it a promising reactive siliceous component. The cement matrix is represented mainly by silicate clinker phases C_3S and C_2S, which ensure early hardening and the formation of $Ca(OH)_2$. The combined use of these components makes it possible to predict the production of aerated concrete with a density of D500–D700, increased structural stability, improved crack resistance, and a rational ratio between strength and thermal conductivity.

Ключевые слова: волластонит, газобетон, ячеистый бетон, зола ТЭС, цемент, XRD, C-S-H, тоберморит, пористая структура.

Keywords: wollastonite, aerated concrete, cellular concrete, thermal power plant ash, cement, XRD, C-S-H, tobermorite, porous structure.

Введение

Газобетон относится к группе искусственных ячеистых каменных материалов, в которых низкая средняя плотность формируется за счет контролируемого газообразования и последующего твердения минеральной матрицы. В классической технологии используют цемент, известь, тонкодисперсный кремнеземистый компонент, воду и алюминиевую пудру. Основная инженерная задача заключается в создании равномерной пористости при сохранении достаточной прочности межпоровых перегородок. Поэтому введение тонкодисперсных кальций-силикатных добавок, в частности волластонита, рассматривается как перспективный путь повышения качества газобетона [1-3].

Волластонит $CaSiO_3$ имеет игольчатую или волокнистую морфологию, сравнительно высокую термостойкость и химическую совместимость с цементно-известковыми системами. В газобетонной смеси он способен повышать устойчивость сырцового массива, снижать риск коалесценции пузырьков водорода, участвовать в формировании C-S-H и гидросиликатов кальция, а также работать как микронаполнитель. При этом избыток волластонита может увеличивать водопотребность и плотность, поэтому его оптимальное количество должно определяться экспериментально [4-6].

Материалы и методы

Аналитический обзор. Для интерпретации свойств волластонитсодержащего газобетона использованы пять научных работ, отражающих три взаимосвязанных направления: прямое применение волластонита в ячеистом бетоне, влияние минеральных добавок на неавтоклавный газобетон и закономерности структурообразования автоклавных ячеистых бетонов. Обобщение этих работ приведено в таблице 1.

Таблица 1. Аналитическое обобщение пяти публикаций, использованных для оценки свойств материала

№	Источник	Что изучалось	Вывод для волластонитового газобетона
1	Mominova et al., Journal of Composite Materials, 2026 [9]	Композит на основе золы и волластонита как замена части портландцемента для ячеистого бетона.	Подтверждает целесообразность системы «зола ТЭС - волластонит - цемент» и возможность замещения части вяжущего без потери порообразующей функции.
2	Il’ina, Rakov, AIP Conf. Proc., 2016 [1]	Неавтоклавный газобетон с минеральными добавками; отмечена роль волластонита и диопсида.	Волластонит полезен как дисперсная добавка, способная ускорять формирование прочной структуры твердеющего цементного камня.
3	Chen et al., Construction and Building Materials, 2017 [7]	Состав сырьевой смеси, водотвердое отношение, давление и продолжительность автоклавирования AAC.	Качество газобетона зависит от баланса CaO/SiO_2, количества газообразователя и режима твердения; волластонит следует учитывать как источник Ca-Si.
4	Shams et al., Construction and Building Materials, 2021 [11]	Кремнеземистое сырье с более высокой растворимостью, температура автоклавирования и образование прочной микроструктуры.	Реакционная способность кремнеземистой фазы критична; аморфная часть золы ТЭС может повышать эффективность гидротермального синтеза.

№	Источник	Что изучалось	Вывод для волластонитового газобетона
5	Choo et al., Materials, 2022 [8]	Волластонитовые волокна и полимерная модификация цементных ремонтных материалов.	Игольчатый волластонит повышает трещиностойкость и долговечность цементной матрицы; аналогичный эффект ожидаем в межпоровых стенках газобетона.

Из приведенного обзора следует, что волластонит не должен рассматриваться только как инертный наполнитель. В ячеистом бетоне он формирует комплексный эффект: уплотняет контактные зоны, стабилизирует пасту в период газообразования, снижает локальные напряжения в межпоровых перегородках и может частично участвовать в кальций-силикатных реакциях. Для автоклавного варианта наиболее важны образование тоберморита и степень растворения кремнезема; для неавтоклавного варианта – скорость гидратации цемента, сохранение равномерности пор и снижение усадочных деформаций.

Сопоставление литературы с представленными дифрактограммами показывает, что исследуемая сырьевая система теоретически пригодна для получения газобетона повышенной структурной стабильности: волластонит обеспечивает кальций-силикатный каркас, цемент – раннее твердение, а зола ТЭС – дополнительную алюмосиликатную реакционную фазу и ресурсосбережение.

Исходные материалы и их роль в формировании газобетона. В качестве исходной научной базы рассмотрены три материала: волластонит, цемент и зола ТЭС. Их совместное применение соответствует современной тенденции перехода от простого пористого цементного камня к композиционному ячеистому материалу, где каждая фаза выполняет технологическую функцию. Волластонит вводится как кальций-силикатная минеральная добавка, цемент является основным гидравлическим вяжущим, а зола ТЭС может частично заменить кремнеземистый компонент и снизить расход клинкера.

При введении алюминиевого газообразователя в щелочную среду цементно-известковой смеси выделяется водород, формирующий систему пор. На этой стадии важны вязкость, седиментационная устойчивость и скорость набора пластической прочности [10].

Таблица 2. Роль исходных материалов в составе волластонитового газобетона

Материал	Основные фазы по XRD	Технологическая функция	Ожидаемый эффект
Волластонит	β-$CaSiO_3$; возможные следы кварца/кальцита	Кальций-силикатная добавка, микроармирование, центры кристаллизации	Рост прочности межпоровых стенок, снижение микротрещин
Цемент	C_3S, C_2S, гипс, возможный кальцит и кварц	Гидравлическое вяжущее и источник $Ca(OH)_2$	Раннее твердение, щелочная среда для газообразования
Зола ТЭС	Аморфная алюмосиликатная фаза, кварц, муллит, Fe_2O_3	Минеральная добавка и кремнеземистый компонент	Пуццолановая активность, снижение расхода цемента

Волластонитовые частицы могут работать как микрокаркас, ограничивающий укрупнение газовых пузырьков. После схватывания цемента формируются гидратные фазы, а при автоклавировании - более кристаллические гидросиликаты кальция, включая тоберморитоподобные образования.

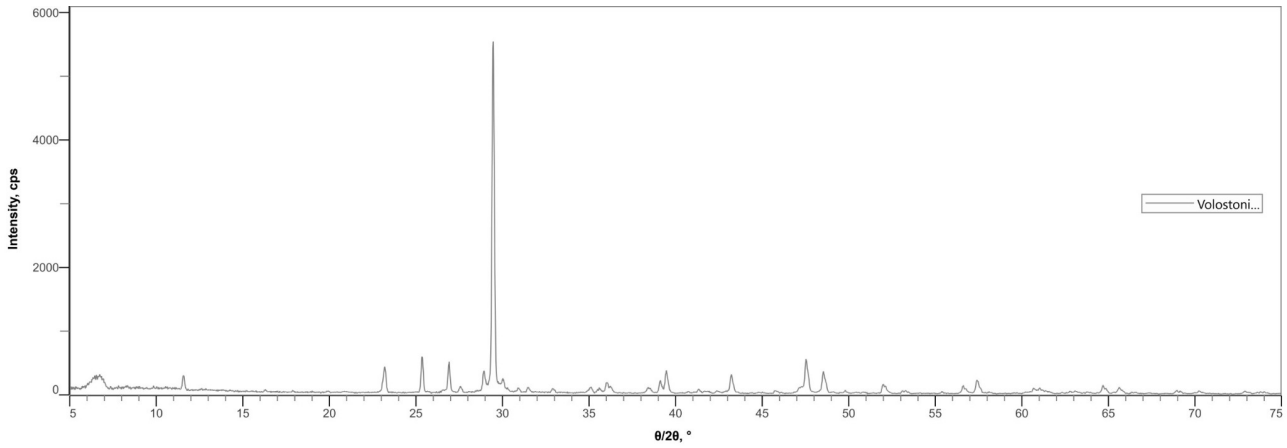


Рисунок 2. Рентгенограмма образца волластонита

На дифрактограмме волластонита наиболее интенсивный рефлекс расположен в области 2θ≈29,4 – 29,6°. Дополнительные пики в областях около 23,0°, 25,4°, 27,0°, 39,5°, 43,5°, 47,3°, 48,5° и 57 – 58° характерны для β-волластонита. Малый пик около 26,6° может указывать на остаточный кварц, а совпадение области 29,4° с основным рефлексом кальцита требует уточнения по цифровым данным. В целом образец можно характеризовать как высококристаллический волластонитовый материал с незначительным количеством сопутствующих фаз.

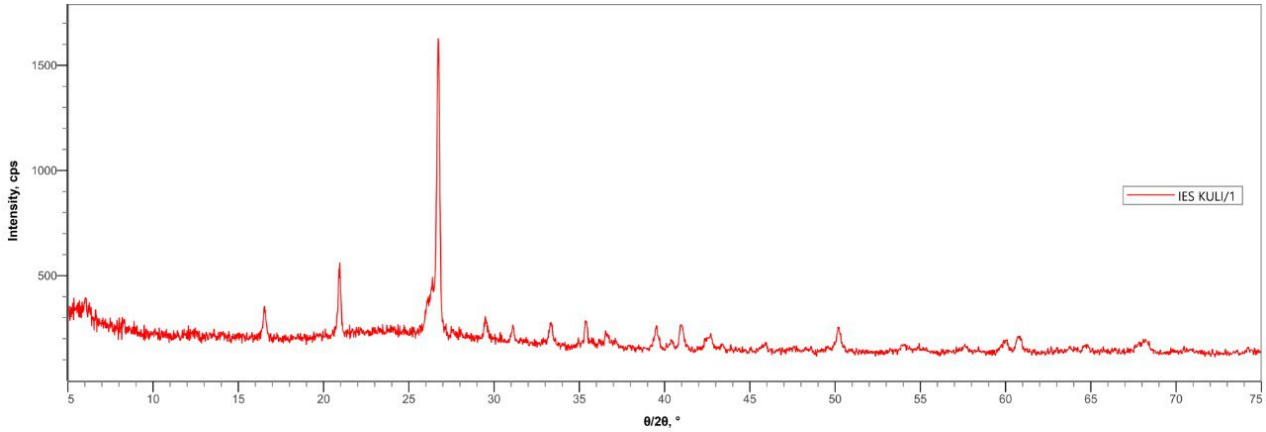


Рисунок 3. Рентгенограмма золы ТЭС

Зола ТЭС имеет выраженный максимум кварца около 2θ=26,6°, пики муллита в областях 16,4°, 25,9°, 31°, 33° и 40 – 42°, а также широкий аморфный фон в интервале 20 – 35°. Такая комбинация фаз важна для газобетона: кварц служит кремнеземистым компонентом, муллит повышает термостойкость минеральной части, а аморфная алюмосиликатная фаза обладает более высокой реакционной способностью и может участвовать в образовании вторичных гидратов кальция.

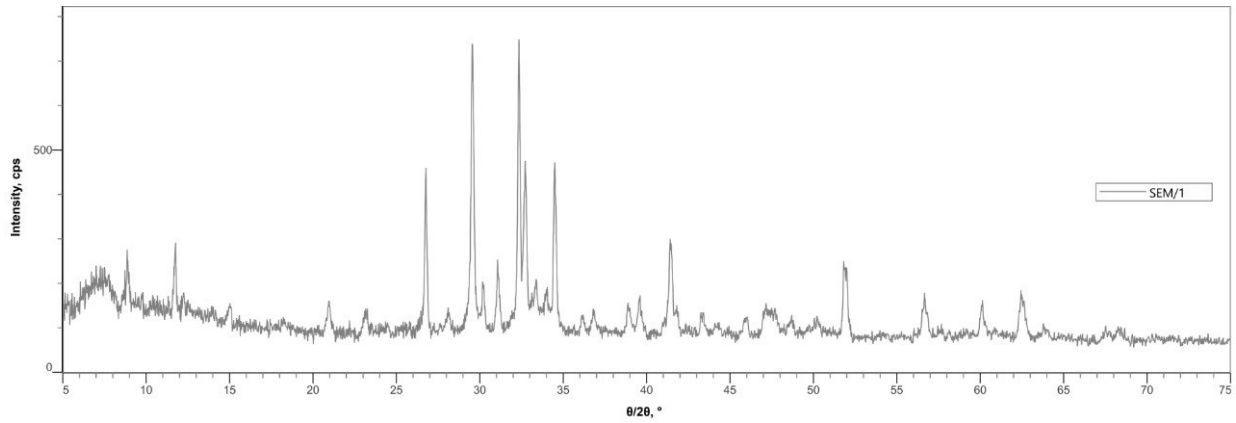


Рисунок 4. Рентгенограмма цементного компонента

Цементная дифрактограмма характеризуется группой интенсивных пиков в области 29 – 35° 2θ, что соответствует основным клинкерным силикатам - алиту C_3S и белиту C_2S. Пики вблизи 11 – 12° и 20 – 21° могут быть связаны с гипсом или сульфатными фазами, регулирующими сроки схватывания, а максимум около 26,6° отражает присутствие кварца. Наличие кальцита в области 29 – 30° также возможно, особенно если цемент содержит известняковый компонент.

При гидратации C_3S и C_2S образуются C-S-H и $Ca(OH)_2$. В неавтоклавном газобетоне эти продукты формируют прочность межпоровых перегородок. В автоклавном газобетоне при температуре порядка 180 – 192 °C и давлении насыщенного пара часть C-S-H переходит в более упорядоченные гидросиликаты кальция. Если в системе имеются тонкодисперсный волластонит и активная аморфная фаза золы, возрастает вероятность более равномерного распределения продуктов гидратации и гидротермального синтеза по объему стенок пор.

На уровне микроструктуры волластонит действует в трех направлениях. Во-первых, как дисперсный минеральный скелет он повышает устойчивость сырцовой массы в момент подъема газобетона. Во-вторых, как кальций-силикатная фаза он совместим с C-S-H и не образует вредной межфазной границы. В-третьих, игольчатая морфология может повышать сопротивление развитию микротрещин, что особенно важно для пористых материалов с тонкими стенками.

Общие свойства волластонитового газобетона. С учетом XRD-анализа и литературных данных свойства материала следует оценивать как комплекс «плотность – прочность – теплопроводность – усадка – водостойкость». Увеличение количества волластонита обычно способствует повышению прочности, однако чрезмерное содержание минеральной добавки способно увеличить среднюю плотность и ухудшить теплоизоляционные характеристики. Поэтому технологически оправдана не максимальная, а оптимальная дозировка.

Физико-механические и эксплуатационные показатели. Для исследуемой сырьевой системы целесообразно рассматривать газобетон как стеновой теплоизоляционно-конструкционный материал. Ориентировочные диапазоны показателей приведены в таблице 3. Они не являются результатами прямого испытания конкретных образцов; это прогнозная инженерная оценка, сформированная по фазовому составу сырья и по литературным данным о ячеистых бетонах с минеральными добавками.

Таблица 3. Ориентировочные свойства газобетона на основе волластонита

Показатель	Ожидаемый диапазон	Положительное влияние волластонита	Ограничение
Средняя плотность	D500-D700	Стабилизация пористой структуры и снижение локального разрушения стенок	При избытке добавки плотность может возрасти
Прочность при сжатии	примерно 2,5-4,0 МПа для стеновых марок	Микроармирование и уплотнение C-S-H-матрицы	Зависит от равномерности пор и режима твердения
Теплопроводность	около 0,12-0,18 Вт/(м·К)	Косвенно улучшается при сохранении мелкой равномерной пористости	Рост плотности повышает λ
Усадка	средняя или пониженная при оптимальной дозировке	Снижение микротрещин и стабилизация каркаса	Высокая водопотребность увеличивает риск усадки
Водостойкость	повышается при плотных межпоровых стенках	Меньшая капиллярная связность и более прочная матрица	Требует контроля открытой пористости

Наиболее вероятный технологический эффект достигается при частичной замене тонкомолотого кремнеземистого компонента и/или части вяжущего композитной добавкой «зола ТЭС - волластонит». Зола снижает стоимость и повышает ресурсную эффективность, а волластонит компенсирует возможное снижение ранней прочности за счет армирующего и структурообразующего действия. При этом необходимо контролировать тонкость помола, водотвердое отношение, содержание алюминиевой пудры, температуру массива перед резкой и режим тепловлажностной обработки.

Практические рекомендации по составу. Для лабораторной проверки рекомендуется использовать серию составов с содержанием волластонита 5, 10, 15 и 20 % от массы минеральной добавки или от части кремнеземистого компонента. Контрольный состав должен выполняться без волластонита. Для каждого состава необходимо определить расплыв смеси, высоту подъема, время схватывания, среднюю плотность, прочность при сжатии, водопоглощение, теплопроводность и усадку. Обязательными методами подтверждения являются XRD после твердения, SEM-микроскопия межпоровых стенок и порометрия.

Оптимальным следует считать не тот состав, который дает максимальную прочность, а тот, который обеспечивает устойчивую пористость, нормативную плотность и минимальный разброс прочностных показателей. Для производственных условий это важнее, чем единичный высокий результат испытания.

Заключение

1. Рентгенофазовый анализ показывает, что представленный волластонит является основным кристаллическим кальций-силикатным компонентом с характерным интенсивным пиком около $2\theta \approx 29{,}5°$. Это подтверждает его пригодность как минеральной добавки для цементно-известковых ячеистых систем.

2. Зола ТЭС содержит кварц, муллит и аморфную алюмосиликатную фазу. Именно аморфная составляющая является наиболее ценной для газобетона, поскольку она способна вступать в пуццолановые и гидротермальные реакции с кальциевыми фазами.

3. Цементный компонент представлен преимущественно силикатами кальция C_3S и C_2S. Он обеспечивает раннее твердение, щелочную среду для газообразования и образование $Ca(OH)_2$, необходимого для последующего формирования C-S-H и гидросиликатов кальция.

4. Волластонитовый газобетон потенциально обладает более стабильной пористой структурой, повышенной микротрещиностойкостью и рациональным соотношением прочности и теплопроводности. Наиболее перспективна композиция, где волластонит используется совместно с золой ТЭС, а не изолированно.

5. Для окончательного подтверждения свойств необходимы экспериментальные испытания по сериям составов с разной дозировкой волластонита, а также количественная фазовая оценка по исходным XRD-файлам и микроструктурный анализ после твердения.

Список литературы

1. Ильина Л.В., Раков М.А. Il’ina L.V., Rakov M.A. Non-autoclaved aerated concrete with mineral additives. AIP Conference Proceedings. 2016. Article 070007 // AIP Conference Proceedings. – 2016. – Т. 1698. – Art. 070007. – DOI: 10.1063/1.4937877.
2. Otajonov O., Sattorov Z. Strength characteristics of aerated concrete with fly ash filler from Angren Thermal Power Plant // E3S Web of Conferences. – 2023. – Т. 365.
3. Отажонов О.А., Сатторов З.М. Влияние золы на характеристики и долговечность бетона // Актуальные проблемы строительства, ЖКХ и техносферной безопасности. – 2022. – С. 190–194.
4. Сатторов З.М., Мирзаев Б.К., Отажонов О.А. Неавтоклавный газобетон как перспективный вариант использования золы угольных ТЭС // Актуальные проблемы строительства, ЖКХ и техносферной безопасности. – 2023. – С. 265–267.
5. Sattorov Z.M., Otajonov O.A. Properties of aerated concrete prepared from Angren fly ash with “SDj-1” additive // AIP Conference Proceedings. – 2025. – Т. 3256.
6. Сатторов З.М., Отажонов О.А. Влияние техногенных отходов на характеристики и долговечности бетона [Электронный ресурс]. // google. com/citations. – 2022. – 194 с. URL: https://scholar. (дата обращения 28.11.2026)
7. Chen, Ying-Liang & Chang, Juu-En & Lai, Yi-Chieh & Chou, Mei-In. A comprehensive study on the production of autoclaved aerated concrete: Effects of silica-lime-cement composition and autoclaving conditions. Construction and Building Materials. 153. 622–629. – 2017. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.116.
8. Choo Y.J., Lee G.H., Lee S.-J., Park C.-G. Effects of Wollastonite Fiber and Styrene-Butadiene Latex Polymer on the Long-Term Durability of Cement-Based Repair Materials. Materials. 2022. Vol. 15(15). Article 5433. DOI: 10.3390/ma15155433.

9. Mominova S., Kopzhassarov B., Smailov B., Kopzhassarov A. The obtaining of composite material based on fly ash and wollastonite for cellular concrete // Journal of Composite Materials. – 2026. – P. 755–772. – DOI: 10.1177/00219983251366636.
10. Qu X., Zhao X. Previous and present investigations on the components, microstructure and main properties of autoclaved aerated concrete – A review. Construction and Building Materials. 2017. Vol. 135. P. 505–516. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.208.
11. Shams T., Schober G., Heinz D., Seifert S. Production of autoclaved aerated concrete with silica raw materials of a higher solubility than quartz. Part II: Influence of autoclaving temperature. Construction and Building Materials. 2021. Vol. 287. Article 123072. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123072.

References

1. Il’ina L.V., Rakov M.A. [Non-autoclaved aerated concrete with mineral additives]. AIP Conference Proceedings, 2016, vol. 1698, art. 070007. DOI: 10.1063/1.4937877 (In Russ.).
2. Otajonov O., Sattorov Z. Strength characteristics of aerated concrete with fly ash filler from Angren Thermal Power Plant. E3S Web of Conferences, EDP Sciences, 2023, vol. 365, P. 02022 (In Russ.).
3. Otajonov O.A., Sattorov Z.M. [The effect of ash on the characteristics and durability of concrete]. Aktual’nye problemy stroitel’stva, ZhKH i tekhnosfernoi bezopasnosti, 2022, P. 190–194 (In Russ.).
4. Sattorov Z.M., Mirzaev B.K., Otajonov O.A. [Non-autoclaved aerated concrete as a promising option for using fly ash from coal power plants]. Aktual’nye problemy stroitel’stva, ZhKH i tekhnosfernoi bezopasnosti, 2023, P. 265–267 (In Russ.).
5. Sattorov Z.M., Otajonov O.A. Properties of aerated concrete prepared from Angren fly ash with “SDj-1” additive. AIP Conference Proceedings, AIP Publishing LLC, 2025, vol. 3256, no. 1, art. 060033 (In Russ.).
6. Sattorov Z.M., Otajonov O.A. [The influence of technogenic waste on the characteristics and durability of concrete]. Available at: (2022) [Электронный ресурс]. – URL: https://scholar.google.com/citations. (In Russ.).
7. Chen Y.-L., Chang J.-E., Lai Y.-C., Chou M.-I. A comprehensive study on the production of autoclaved aerated concrete: Effects of silica-lime-cement composition and autoclaving conditions. Construction and Building Materials, 2017, vol. 153, P. 622–629. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.116.
8. Choo Y.J., Lee G.H., Lee S.-J., Park C.-G. Effects of wollastonite fiber and styrene-butadiene latex polymer on the long-term durability of cement-based repair materials. Materials, 2022, vol. 15, no. 15, art. 5433. DOI: 10.3390/ma15155433.
9. Mominova S., Kopzhassarov B., Smailov B., Kopzhassarov A. The obtaining of composite material based on fly ash and wollastonite for cellular concrete // Journal of Composite Materials. – 2026. – P. 755–772. – DOI: 10.1177/00219983251366636.

10. Qu X., Zhao X. Previous and present investigations on the components, microstructure and main properties of autoclaved aerated concrete – A review. Construction and Building Materials, 2017, vol. 135, P. 505–516. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.208.
11. Shams T., Schober G., Heinz D., Seifert S. Production of autoclaved aerated concrete with silica raw materials of a higher solubility than quartz. Part II: Influence of autoclaving temperature. Construction and Building Materials, 2021, vol. 287, art. 123072. DOI: 10.1016/j.conbuildmat. 2021.123072.

Статья поступила в редакцию: 30.10.2026
Статья принята к публикации: 05.11.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 711.58

DOI: 10.32743/UniTech.2026.152.11.23669

Программа городского развития для периферийных районов крупного города

Фазлыева Энже Маратовна
магистрант кафедры
Градостроительство, Московский архитектурный институт (государственная академия)
Российская Федерация, г. Москва
E-mail: enzhefazlyeva@gmail.com

Крашенинников Алексей Валентинович
д-р архитектуры, проф.
кафедры «Градостроительство», Московский архитектурный институт (государственная академия)
Российская Федерация, Москва
E-mail: ud-marhi@mail.ru

Urban development program for a big city's peripheral neighborhoods

Fazlyeva Enzhe Maratovna
Master's degree student, Moscow Architectural Institute (State Academy)
Russia, Moscow

Krashreninnikov Alexey
doctor of Architecture, Professor of the Department of Urban Planning Moscow Architectural Institute (State Academy)
Russia, Moscow

Аннотация

Теоретические представления о роли окраин в структуре современного крупного города сопровождаются активным поиском современных методологических подходов к исследованию и проектированию. Вместо безликих «спальных зон» периферийные территории следует рассматривать как самодостаточные жилые образования, способные поддерживать полноценный городской образ жизни. Для структурирования задач градостроительного анализа и проектирования предлагается пятиблочная система, соответствующая «видимому спектру градостроительных проблем». Последовательность от экологии до композиции соответствует алгоритму градостроительного анализа, а задачи городского проектирования расположены в обратном порядке, от пространственной

Библиографическое описание: Фазлыева Э.М., Крашенинников А.В. Программа городского развития для периферийных районов крупного города // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23669

композиции к элементам планировочной структуры. Задачи обеспечения качества жилой среды включают целостное понимание роли и назначения территории, жизнестойкость социально-пространственных конструкций, безопасность и комфорт проживания, а также природную устойчивость. Формирование планировочной структуры начинается с пространственной идеи и целеполагания, за которым следует организация инфраструктуры и развитие экологического каркаса. При этом каждый последующий уровень служит инструментом для реализации первоначально определенной концепции, обеспечивая согласованность всех компонентов. Данный подход позволяет не только оценить текущее состояние территории, но и сформировать сбалансированную программу её развития, учитывающую все ключевые аспекты качества городской среды.

Abstract

Theoretical concepts regarding the role of outskirts in the structure of a modern large city are accompanied by an active search for modern methodological approaches to research and design. Instead of faceless «sleeping areas», peripheral territories should be viewed as self-sufficient residential entities capable of supporting a full-fledged urban way of life. To structure the tasks of urban planning analysis and design, a five-block system is proposed, corresponding to the «visible spectrum of urban planning problems». The sequence from ecology to composition corresponds to the algorithm of urban planning analysis, while the tasks of urban design are arranged in reverse order, from spatial composition to elements of the planning structure. The tasks of ensuring the quality of the living environment include a holistic understanding of the role and purpose of the territory, the resilience of socio-spatial structures, safety and comfort of living, as well as natural sustainability. The formation of the planning structure begins with a spatial idea and goal-setting, followed by the organization of infrastructure and the development of the ecological framework. At the same time, each subsequent level serves as a tool for implementing the initially defined concept, ensuring the consistency of all components. This approach makes it possible not only to assess the current state of the territory but also to develop a balanced program for its development that takes into account all the key aspects of urban environmental quality.

Ключевые слова: периферийные территории крупного города, городские окраины, самодостаточный жилой район, полуавтономные городские образования, градостроительная модель.

Keywords: peripheral territories of a large city, urban outskirts, self-sufficient residential district, semi-autonomous territory, urban planning model.

Введение

Окраинные территории чаще всего обеспечивают основной прирост городской застройки [1]. Однако, несмотря на активное освоение данных территорий и решение основных функционально-планировочных и инфраструктурных задач, их результаты во многих случаях не соответствуют актуальным требованиям формирования здоровой, психологически благополучной для жизни среды.

Существующая модель развития периферии продолжает воспроизводить функционально однородные жилые районы, где ключевым ориентиром выступают показатели экономической эффективности – интенсивность использования земли и объёмы строительства, в то время как качественные параметры среды остаются второстепенными. Сегодня такие районы отличаются однотипностью, несоразмерным масштабом застройки, нарушенной логикой социальной организации и скудными общественными пространствами. Они не формируют собственных точек притяжения, достаточного количества мест приложения труда, образовательных, культурных и сервисных функций. Отсутствие структурно выраженных локальных центров, пешеходной связанности и разнообразных сценариев повседневной активности приводит к ослаблению социальных связей, низкой функциональной и событийной насыщенности жилых образований. В совокупности перечисленные факторы приводят к снижению привлекательности данных территорий и формированию маргинальной среды. Вследствие этого периферийные жилые образования остаются слабо интегрированными в общегородскую структуру и сильно зависимыми от исторического делового центра – ядра притяжения, трафика и инвестиций.

Анализ современного состояния окраинных жилых районов города показывает, что основная причина снижения качества среды заключается не только в плотности или масштабах строительства как таковых, а в отсутствии грамотно организованной планировочной структуры, способной обеспечивать локальную автономность и устойчивую жизнеспособность. Для решения обозначенных проблем необходимо сформировать градостроительную модель развития периферийной территории крупного города, обладающей высокой самодостаточностью и создающей условия для полноценного городского образа жизни.

Актуальность разработки градостроительной модели также обусловлена повышением требований к качеству жилой среды, включая уровень комфорта, доступности и безопасности проживания, экологической устойчивости, а также развитие культурной и досуговой инфраструктуры. Перечисленные приоритеты соответствуют национальным целям развития Российской Федерации.

Материалы и методы

Теоретическая основа исследования самодостаточных городских образований формировалась на протяжении XX – XXI вв. Одной из ключевых тенденций является переход от «традиционной» модели с перенасыщенным центром и зависимыми окраинами к сети взаимосвязанных полуавтономных урбанизированных районов. В связи с этим ключевым методологическим ориентиром выступает концепция «15-минутного города» (Карлос Морено), направленная на равномерное распределение базовых функций в пределах пешеходной доступности. Концепция предполагает создание компактных районов, в которых жители смогут работать, получать доступ к различным необходимым услугам, инфраструктуре и возможностям для досуга в непосредственной близости от своего дома.

Однако полноценная интеграция окраин в общегородскую структуру требует не только обеспечения географической близости к конкретным видам повседневной деятельности, но и формирования городской среды, способной поддерживать разнообразные сценарии городской активности.

Принципы развития градостроительных систем, были сформулированы Алексеем Гутновым [3], согласно которым периферия «врастает» в город, но не может, по определению, соперничать с центральным районом, отсюда возникает идея полицентричности и частичной автономности периферийных территорий.

Каркас на отдаленных территориях формируется не в виде непрерывных линейных систем вдоль транспортных коммуникаций, а представлен отдельным ядрами, обеспечивающими наиболее полную концентрацию общественных функций. Интенсивное развитие территории, максимально разрешенная плотность и насыщенность городской среды людьми и событиями – необходимые условие оживления городской среды.

Согласно теории К. Линча, районы следует рассматривать как целостную среду жизнедеятельности, в которой пространственная структура, социальные процессы и поведенческие реакции человека находятся в тесной взаимосвязи. Особое значение придаётся способности городской среды адаптироваться к меняющимся потребностям населения и учитывать долгосрочные экологические и социальные последствия градостроительных решений. В своей работе «Совершенная форма в градостроительстве» Кевин Линч выделяет следующие «показатели качества градостроительной формы»: жизнепригодность, доступность, удобство, контроль, содержательность, целесообразность и социальную справедливость [5]. Он рассматривает перечисленные показатели как взаимосвязанную систему критериев, определяющих способность среды обеспечивать качественную жизнедеятельность человека.

Теоретическая модель структурной организации компонентов и типов территориально-пространственных объектов застройки поселений разработана Ю.В. Алексеевым [2]. Базовая Модель представляет собой инструмент для комплексного градостроительного анализа и проектирования территорий. Модель строится по иерархическому принципу и включает следующие уровни:

Таблица 1. Уровни

Уровень	Описание
Территориальный объект	Участок земли или квартал; характеризуется границами, площадью, правовым статусом.
Пространственный объект	Участок земли или квартал; характеризуется границами, площадью, правовым статусом.
Функциональный объект	Здания и сооружения с учётом их назначения: жилые дома, школы, магазины.
Связи и отношения	Взаимодействие между объектами: пешеходные маршруты, инженерные сети, социальные связи.

Согласованная классификация градостроительных и архитектурных объектов применима при разработке генеральных планов, мастер-планов территорий, анализе эффективности использования земель и формировании комфортной городской среды.

В рамках федерального проекта «Формирование комфортной городской среды» и утверждённой Методики определения индекса качества городской среды (приказ Минстроя России № 1494/пр) выделяются пять ключевых измерений, по которым оценивается качество

городской среды. Эти измерения используются для комплексной оценки муниципальных образований всех типов – от малых городов до мегаполисов, с учётом климатических особенностей:

Таблица 2. Измерения для комплексной оценки муниципальных образований всех типов – от малых городов до мегаполисов, с учётом климатических особенностей

№	Измерение (критерий)	Краткое описание / Примеры показателей
1.	Безопасность	Освещённость улиц, дворов; наличие камер видеонаблюдения; состояние подъездных путей; уровень преступности в общественных пространствах.
2.	Комфортность	Качество дорожного покрытия, тротуаров, доступность общественного транспорта, благоустроенность дворовых территорий, удобство навигации
3.	Экологичность и здоровье	Наличие озеленённых пространств, чистота воздуха, шумовой фон, доступ к рекреационным зонам, экологическая безопасность объектов инфраструктуры.
4.	Идентичность и разнообразие	Уникальность архитектурного облика, сохранение историко-культурного наследия, разнообразие функций городских пространств, культурное многообразие.
5.	Современность и актуальность среды	Уровень цифровизации услуг, использование современных материалов и технологий благоустройства, соответствие инфраструктурных решений современным стандартам жизни.

Для построения программы развития территории предлагается использовать модель А.В. Крашенинникова («Видимый спектр градостроительных проблем») [6]. Она включает пять аспектов программы градостроительного развития территории:

Таблица 3. Значения

№	Аспект проблемы	Краткое описание
1.	Природная среда и экология	Качество воздуха, воды; озеленение; защита от шума и загрязнений.
2.	Городская инфраструктура	Транспортные сети, инженерное обеспечение, доступность сервисов.
3.	Социально-пространственная организация	Комфортность проживания, безопасность, социальная инфраструктура, пешеходная доступность.
4.	Историко-культурная содержательность	Сохранение наследия, формирование идентичности, культурный потенциал пространства.
5.	Художественный облик и образность	Сохранение наследия, формирование идентичности, культурный потенциал пространства.

Программирование отражает постепенное возрастание уровня сложности рассматриваемых проблем городской среды – от условий выживания к воплощению культурных и духовных ценностей.

Рисунок 1. Крашенинников А.В. «Видимый спектр градостроительных проблем» [6]

Такой подход позволяет не только оценить текущее состояние территории, но и сформировать сбалансированную программу её развития, учитывающую все ключевые аспекты качества городской среды. Метод анализа аспектов градостроительной деятельности получил название «спектральный анализ». В рамках спектрального анализа выделяются пять измерений качества городской среды, которые были повторены в Стандарте комфортной городской среды.

Результаты и обсуждение

Проектирование периферийных жилых районов сопряжено с необходимостью одновременного решения задач по всем разделам программы. Применение «спектральной модели» позволяет не только ставить проблемы, но и систематизировать слабо проработанные аспекты, связанные с социальными и интеллектуальными потребностями городского населения. Предлагается рассмотреть выделенные измерения по следующим вопросам:

- Рациональное использование ресурсов
- Снижение нагрузок на инфраструктуру
- Эко-защитные технологии
- Разнообразие сценариев и возможностей для населения;
- Защита интересов различных групп населения.

1. Блок «Природная среда и экология». Ключевой критерий: здоровье жителей.

В основе формирования данного блока лежат фундаментальные (биологические) потребности человека, связанные с его физиологическим и психологическим благосостоянием. Удовлетворение этих потребностей возможно через формирование благоприятной природной среды, способной поддерживать экологическую устойчивость, здоровье населения и комфортность проживания.

Поскольку огромным достоинством периферийных территорий является наличие разнообразных компонентов природной среды, необходимо их грамотно интегрировать в планировочную структуру жилого района. Задача заключается в рациональном использовании природного ландшафта, сохранении ценных, особо охраняемых территорий, экологической реабилитации нарушенных участков и формировании недостающих элементов ландшафта с последующей интеграцией в структуру природно-экологического каркаса. Особую роль здесь играет связанность природных компонентов, обеспечивающая непрерывность зелёной инфраструктуры и её доступность в повседневной жизни населения.

При этом обязательно следует учитывать воздействие человеческой деятельности на природную среду. Такого рода воздействия впоследствии могут привести к существенному снижению качества окружающей среды, а значит, и к ухудшению комфорта и состояния здоровья человека. Для того чтобы сохранить экосистему, необходимы эффективные меры, направленные на снижение антропогенной нагрузки и её негативного воздействия на среду. Поэтому важна не только системная работа по сохранению и охране природной среды, но и внедрение технологий по восстановлению и поддержанию природного окружения на уровне эффективного воспроизводства.

На уровне жилой застройки ключевым критерием сохранения и укрепления здоровья человека выступает соблюдение санитарно-гигиенических условий жизнедеятельности (параметры воздуха, воды, почвы, инсоляция и аэрация дворовых пространств).

1.1 Рациональное использование ландшафта;

1.2 Снижение антропогенных нагрузок;

1.3 Регенеративный дизайн;

1.4 Устойчивое развитие на основе методов «конструктивной экологии»;

1.5. Здоровьесберегающие технологии.

2. Блок «Городская инфраструктура». Ключевой критерий: комфорт.

Данный блок в структуре градостроительной модели отражает опосредованные фундаментальные потребности человека, обеспечиваемые технологиями современной цивилизации. Он направлен на организацию удобной городской среды для проживания, учебы, работы и досуга посредством рационального использования земли, выявления структурно-планировочных узлов и элементов каркаса, функциональной организации, обеспечения населения объектами социального обслуживания, эффективными транспортно-пешеходными и инженерно-техническими коммуникациями, а также условиями для хранения личных автомобилей.

Касательно параметров жилой застройки, ключевыми характеристиками выступают показатели этажности и плотности. При этом плотность не является однозначным индикатором качества городской среды, её необходимо рассматривать в совокупности с пространственной конфигурацией застройки и характером застроенных и незастроенных пространств, поскольку одинаковые показатели плотности могут реализовываться через принципиально разные формы – от компактной среднеэтажной застройки до разреженных высотных структур, – оказывая разное влияние на уличную жизнь, микроклимат и восприятие городской среды [7].

Также важным аспектом является установление размеров, границ и конфигурации планировочных модулей с наиболее целесообразным набором функций и связей. Чётко заданные параметры модулей позволяют более рационально размещать и адаптировать застройку, инфраструктуру и общественные пространства, избегая типичных для периферийных территорий фрагментации и «пустот».

2.1 Рациональная планировочная структура УДС;

2.2 Снижение транспортных нагрузок;

2.3 Использование экологически чистых технологий утилизации мусора и стоков;

2.4 Мультимодальные передвижения, велодорожки;

2.5 Внедрение экологически чистых источников тепла и энергии.

3. Блок «Социально-пространственная организация». Ключевой критерий: безопасность.

В рамках данного блока городская среда рассматривается как система, в которой пространственная организация территории напрямую влияет на характер её использования, социальные процессы, а также поведение потребителей и участников. Поэтому пространственное зонирование жилого района должно быть направлено на создание микроклимата доброжелательного соседства между жителями района, увеличение разнообразия и возможностей выбора форм общения, сценариев социальной активности и повышение у городского населения чувства принадлежности и сопричастности к месту своего проживания. Если жители будут чувствовать связь со своим районом и воспринимать его как нечто комфортное и позитивное, они с большей вероятностью будут пользоваться местными удобствами в повседневной жизни и не совершать ежедневные поездки в другие районы.

Также важным фактором повышения качества жизни на периферии является формирование безопасной и контролируемой среды, достигаемой за счёт принципов «естественного наблюдения», визуальной проницаемости пространств и активного уличного фронта. По мнению Джейн Джекобс, «общественное спокойствие больших городов (спокойствие на их тротуарах и улицах) лишь во вторую очередь обеспечивается полицией, сколь бы необходима она ни была. Прежде всего, оно поддерживается сложной, почти незаметной сетью контроля и слежения, сотканной самим населением» [4].

Результатом грамотной организации городской среды должны стать позитивные изменения в образе жизни населения, а именно увеличение добровольной физической активности на свежем воздухе, рост пешеходной мобильности и вовлечённости представителей различных возрастных и социальных групп в разнообразные формы общественной активности.

3.1 Рациональные размеры планировочных модулей, кварталов;

3.2 Обеспечение пассивной безопасности (социальный контроль);

3.3 Выявление пешеходных макро-пространств городской среды для структурирования застройки;

3.4 Обеспечение разнообразия городской среды (разнообразных сценариев освоения мезо-пространств на основе микро-зонирования ТОП);

3.5 Внедрение элементов универсального дизайна на уровне микро-пространств городской среды.

4. Блок «Историко-культурная содержательность». Ключевой критерий: смысл.

Данный блок отражает пассивные интеллектуальные потребности человека, связанные с восприятием, осмыслением территории через культурное наполнение и рациональную систему пространственных структур.

Преодоление проблем, связанных с монотонностью периферийных жилых районов, возможно с помощью формирования смыслового каркаса территории. Это предполагает создание локальных общественных центров и рациональной системы пешеходных пространств, формирующих непрерывную ткань территории общего пользования [8]. При этом пространства должны быть иерархически организованы в четкую, взаимосвязанную систему различных масштабов и функций.

В этой логике формирование каркаса предполагает не просто размещение функциональных узлов, а создание системы взаимосвязанных «силовых центров», описанных в книге «Природа порядка» Кристофера Александера [10]. «Силовые центры» в данном случае представляют собой локусы общественной жизни – ключевые компоненты идентичности мест. Каждый центр становится носителем определённых сценариев использования и эмоционального опыта, закрепляя за пространством конкретные смыслы и образы в восприятии пользователей. Смысловая содержательность среды делает её культурно интерпретируемой, узнаваемой, уникальной и эмоционально значимой средой жизнедеятельности.

4.1 Рациональная система городского центра и пешеходных пространств (центральность);

4.2 Обеспечение узнаваемости и уникальности (идентичности) городской среды;

4.3 Баланс сохранности и использования объектов культурного наследия;

4.4 Поддержание взаимосвязанности (иерархии) центров (доминант), достопримечательностей и памятных мест, имеющих важное общественное значение;

4.5 Развитие инфраструктуры туризма и гостеприимства.

5. Блок «Художественный облик и образность». Ключевой критерий: красота.

В основе формирования данного блока лежат духовные и активные интеллектуальные потребности человека, удовлетворяемые посредством формирования целостного, выразительного и эстетически привлекательного городского пространства. Художественный облик территории складывается из ритмики, контекстуальной обусловленности и визуальной согласованности отдельных объектов среды. Также он определяется степенью ясности и читаемости пространства. Выявление и закрепление ландшафтных, индивидуальных художественных особенностей среды и обеспечение разнообразия архитектурных решений позволят избежать монотонности, создать визуально насыщенную среду и сформировать уникальный облик территории.

5.1 Рациональное использование ландшафта – силуэтность застройки (с учетом значимости панорамы);

5.2 Индивидуальная, авторская архитектура зданий и сооружений;

5.3 Баланс регулирования и спонтанности при формировании облика застройки;

5.4 Поддержание нематериального наследия в программах развития территории;

5.5 Внедрение средового кода для поддержания целостности городской среды.

От исследования к проектированию

Опыт градостроительного анализа и выявление предпосылок развития территории показывают эффективность послойного выявления проблем и предпосылок развития территории по пяти направлениям «спектральной модели». Собранные вместе резервы и ограничения в развитии территории становятся темой для формирования пространственной модели, однако пространственное решение и градостроительная концепция формируются в обратном порядке:

1. Семантическая карта: топонимика и идентичность территорий ОКН+ООПК (структура осей, доминант и ориентиров, морфология рельефа);
2. Топологическая карта территории: макро-пространства, анклавы жилой застройки, цепочки центров, ядра пешеходных округов;
3. Карта пешеходных пространств – микро-зонирование ТОП, туристические/ рекреационные/деловые маршруты;
4. Карта развития инфраструктуры, прежде всего системы главных магистралей, общественного транспорта и парковок;
5. Схема планировки: красные линии кварталов, синие линии застройки, назначение кварталов, использование первых этажей и отступы палисадников.

Заключение

Как правило, чем больше мы отдаляемся от центра города, тем хуже становится качество жилой среды, что усиливает контраст между периферийными территориями и районами, расположенными ближе к центру. Данная тенденция приводит к неоднородности городского пространства. Поэтому переход к полицентричной структуре является логичным направлением городского развития. Выравнивание потенциалов приведет к повышению общей комфортности и привлекательности города. В этом контексте предложенный подход предполагает создание самодостаточной и равнозначной части города, способной поддерживать высокий уровень качества жизни населения и устойчивость городской системы в целом.

Список литературы

1. Археология периферии: Исследование для Московского урбанистического форума 2013 «Мегаполисы: развитие за пределами центра» / Команда ПРОЕКТ МЕГАНОМ; Институт медиа, архитектуры и дизайна СТРЕЛКА. – Москва, 2013. – 529 с.
2. Алексеев, Ю.В. Градостроительное проектирование: учебное пособие / Ю.В. Алексеев, А.А. Ануфриев. – Москва; Берлин: Директ-Медиа, 2019. [Электронный ресурс]. – 626 с. URL: https://znanium.ru/catalog/product/1908050 (дата обращения: 24.10.2026).
3. Гутнов А. Эволюция градостроительства. – 2-е изд. – Москва; Екатеринбург: Tatlin. – 2024. – 352 с.
4. Джейн Джекобс. Смерть и жизнь больших американских городов. – М.: Новое издательство, 2011. – 460 с.

5. Кевин Линч. Совершенная форма в градостроительстве. Пер. Глазычева В.Л. М, Стройиздат. – 1982. – 560 с.
6. Крашенинников А.В. Видимый спектр градостроительных проблем // В сборнике: Градостроительное искусство. Новые материалы исследований РААСН, НИИТАГ. Выпуск 1. – Москва: ВНИИТАГ, 2007. – С. 461–463.
7. Крашенинников И.А. Перспективы анализа «пористости» городской ткани // Architecture and Modern Information Technologies. – 2017. – № 3 (40). – P. 215–226. URL: http://marhi.ru/AMIT/2017/3kvart17/16_krasheninninkov/index.php.
8. Гейл Я. Жизнь среди зданий: пер. с англ. / Я. Гейл. – Москва: Альпина Паблишер, 2012. – 200 с.
9. Линч К. Образ города / пер. с англ. В.Л. Глазычева; сост. А.В. Иконников; под ред. А.В. Иконникова / К. Линч. – Москва: Стройиздат, 1982. – 328 с.
10. Aleksander Chr. The nature of order. An essay on the Art of Building and The Nature of the Universe. Book two: The process of creating life. – Berkley, California: The center for environmental structure. – 2002. – 636 P.

References

1. Archaeology of the Periphery: A Study for the Moscow Urban Forum 2013 “Megacities: Development Beyond the City Centre” / Project Meganom Team; Strelka Institute for Media, Architecture and Design. – Moscow, 2013. –529 P.
2. Alekseev Yu.V. Urban planning: textbook / Yu.V. Alekseev, A.A. Anufriev. – Moscow; Berlin: Direct-Media, 2019. (access date: 10/24/2026) [Электронный ресурс]. – 626 P. – URL: https://znanium.ru/catalog/product/1908050 (accessed: 31.10.2026).
3. Gutnov A. The Evolution of Urban Planning. – 2nd ed. – Moscow; Yekaterinburg: Tatlin. – 2024. – 352 P.
4. Jacobs J. The Death and Life of Great American Cities. – New York: Random House, 1961.
5. Kevin Lynch. The Image of the City. – Translated by Glazychev V.L.M., Stroyizdat. – 1982. – 560 P.
6. Krasheninnikov A.V. The Vsible Spector of Urban Development Problems. In the collection «Urban Development Art». New research materials of Russian Academy of Architecture and Construction Science, VNIITAG, issue 1, 2007, P. 461–463.
7. Krasheninninkov I. Research Directions to Study Urban Tissue «Porosity». Architecture and Modern Information Technologies. Available at: [Электронный ресурс]. – 2017. – No. 3 (40). – P. 215–226. – URL: http://marhi.ru/eng/AMIT/2017/3kvart17/16_krasheninninkov/index.php (accessed: 31.10.2026).
8. Gehl, J. Life Between Buildings: Using Public Space / Translated from English. – Moscow: Alpina Publisher, 2012. – 200 P.
9. Lynch, K. The Image of the City / Translated from English by V.L. Glazychev; compiled and edited by A.V. Ikonnikov. – Moscow: Stroyizdat, 1982. – 328 P.

10. Aleksander Chr. The nature of order. An essay on the Art of Building and The Nature of the Universe. Book two: The process of creating life. – Berkley, California: The center for environmental structure. – 2002. – 636 P.

Статья поступила в редакцию: 09.11.2026
Статья принята к публикации: 14.11.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 691.32+678.4

DOI: 10.32743/UniTech.2026.152.11.23738

Исследование физико-механических свойств бетона, модифицированного резиновой крошкой и стальными волокнами, полученными из отходов автомобильных шин

Хасанов Собир Садыкович
канд. техн. наук, доц.
Ташкентский университет архитектуры и строительства
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Шакиров Икрам Исламович
докторант кафедры
Технология строительных материалов и конструкций, Ташкентский архитектурно-строительный университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: ikrom.shakirov404@gmail.com

Соттикулов Элёр Сотимбоевич
д-р техн. наук
вед. научн. сотр. ООО Ташкентский научно-исследовательский институт химической технологии
Республика Узбекистан, п/о Ибрат

Investigation of the physical and mechanical properties of concrete modified with rubber crumb and steel fibers recovered from waste automobile tires

Khasanov Sobir
candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Tashkent University of Architecture and Civil Engineering
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Shakirov Ikram
PhD, researcher
of the Department, of Construction Materials and Structural Engineering Technology Tashkent University of Architecture and Civil Engineering
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Sottikulov Elyor
doctor of Technical Sciences, Leading Researcher
LLC Tashkent Research Institute of Chemical Technology
Republic of Uzbekistan, Ibrot p.o

Библиографическое описание: Хасанов С.С., Шакиров И.И., Соттикулов Э.С. Исследование физико-механических свойств бетона, модифицированного резиновой крошкой и стальными волокнами, полученными из отходов автомобильных шин // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23738

Аннотация

В настоящее время увеличение объёмов отработанных автомобильных шин делает их экологически безопасную переработку и эффективное использование при производстве строительных материалов одним из актуальных направлений научных исследований.

В настоящем исследовании резиновая крошка фракции 5-20 мм, полученная из отходов автомобильных шин, а также стальные волокна длиной 16-50 мм и диаметром 0,3 мм, извлечённые из шинных отходов, использовались в качестве материалов для замены 20 % объёма природного крупного заполнителя щебня в составе бетона. Физико-механические свойства бетона изучались экспериментальными методами. Изготовленные бетонные образцы сравнивались с образцами контрольного состава, а их прочность при сжатии определялась в возрасте 3, 7 и 28 суток. Кроме того, с целью улучшения адгезионного взаимодействия между резиновая крошка и цементным камнем в бетонную смесь вводился суперпластификатор ПКАН-55ТБ, после чего оценивалось его влияние на механические свойства бетона. Результаты исследования показали, что частичная замена щебня резиновая крошка приводит к снижению прочности бетона при сжатии. Однако совместное введение стальных волокон и резиновая крошка позволяет в значительной степени компенсировать возникающие потери прочности.

Abstract

Currently, the increasing volume of end-of-life automobile tires has made their environmentally safe recycling and effective utilization in the production of construction materials an important area of scientific research. In this study, rubber crumbs with a particle size of 5-20 mm, obtained from end-of-life automobile tires, and steel fibers extracted from tire waste, with lengths of 16-50 mm and a diameter of 0.3 mm, were used as materials to replace 20 % of the volume of natural coarse aggregate crushed stone in concrete. The physical and mechanical properties of the concrete were investigated using experimental methods. The prepared concrete specimens were compared with control specimens, and their compressive strength was determined at curing ages of 3, 7, and 28 days. In addition, the superplasticizer Pkan-55TB was incorporated into the concrete mixture to improve the adhesion between the rubber crumbs and the cement matrix, and its effect on the mechanical properties of concrete was evaluated. The results showed that the partial replacement of crushed stone with rubber crumbs leads to a reduction in the compressive strength of concrete. However, the combined incorporation of steel fibers and rubber crumbs makes it possible to substantially compensate for the resulting loss of strength

Ключевые слова: резиновая крошка, отработанные автомобильные шины, прочность при сжатии, природный крупный заполнитель, бетон, суперпластификатор, стальные волокна.

Keywords: rubber crumb, end-of-life tires, compressive strength, natural coarse aggregate, concrete, superplasticizer, steel fibers.

Введение

В последние годы в мировом масштабе в результате стремительного роста численности населения значительно увеличилось количество автомобилей, что, в свою очередь, привело к существенному повышению спроса на автомобильные шины [5]. Это обусловило увеличение объёмов шин, выведенных из эксплуатации по истечении срока их службы. По всему миру ежегодно около 1,5 миллиарда автомобильных шин достигают конца срока эксплуатации, а к 2030 году, согласно прогнозам, этот показатель может составить около 5 миллиардов шин в год [8, 1, 6]. В результате утилизация отработанных шин и их эффективное повторное использование становятся актуальными экологическими проблемами с точки зрения охраны окружающей среды и защиты здоровья человека [9].

Рисунок 1. Процесс переработки изношенных шин

При переработке отходов автомобильных шин следует учитывать, что средний состав одной обычной шины легкового автомобиля включает 86 % резины, 10–27 % стальной проволоки и 4 % текстильных волокон. Из одной тонны автомобильных шин можно получить около 600–650 кг чистой резины, 130–150 кг текстильных волокон и 130–200 кг металла [4]. Переработка автомобильных шин позволяет не только утилизировать резиновые отходы, но и извлекать ценные вторичные материальные ресурсы, в частности стальные волокна. Стальные волокна, полученные в результате такой переработки, обладают экономическими и экологическими преимуществами и могут рассматриваться в качестве устойчивой альтернативы традиционным стальным волокнам при использовании в составе бетона [1].

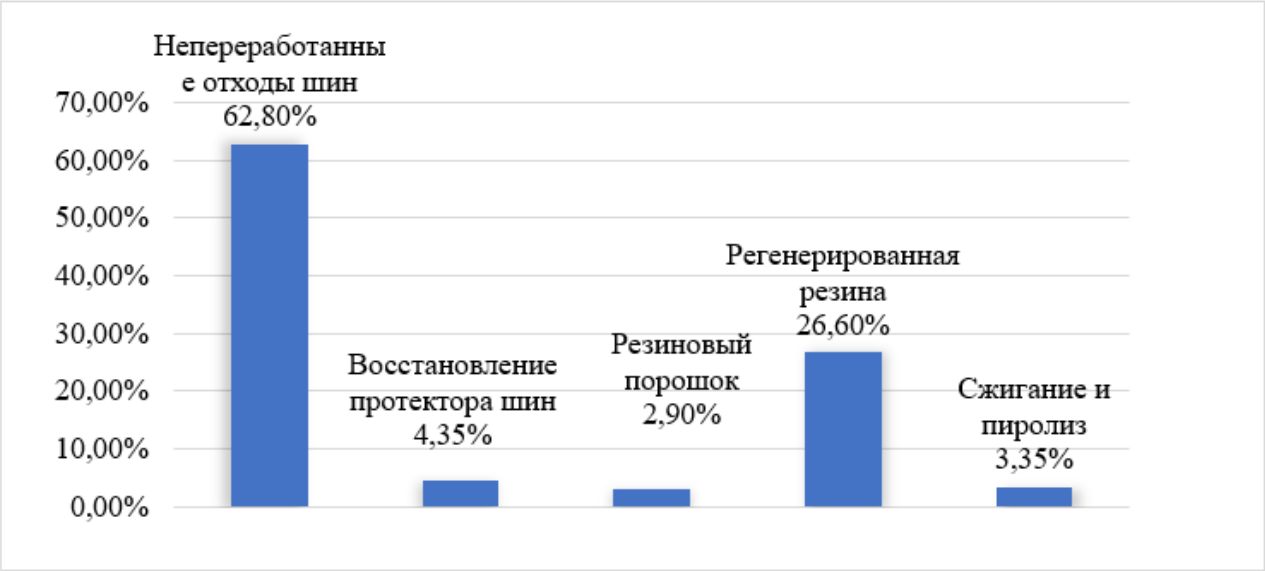


Рисунок 2. Показатели переработки и утилизации отработанных автомобильных шин

В многочисленных научных исследованиях, проведённых учёными разных стран, подробно изучено влияние резиновых материалов различной формы и размеров, в том числе резиновая крошка и резиновых гранул, на свойства строительных материалов, а также возможности применения стальных волокон, полученных в результате переработки отработанных автомобильных шин, в составе бетона. В частности, в исследованиях M. Valente и соавторов отмечено, что при замене 20 % мелкого заполнителя резиновым порошком прочность бетона снижалась с 65–75 МПа до 27–30 МПа. Однако вследствие уменьшения модуля упругости наблюдалось повышение деформационной способности материала [2]. В другом исследовании изучалось влияние добавления резинового порошка в количестве до 15 % взамен песка, а также микрокремнезема в дозировке 2,5–5 % на свойства бетона. Установлено, что микрокремнезем в небольших количествах не оказывал существенного влияния на прочность бетона, однако способствовал снижению его водопоглощения [10]. В исследованиях Y. Deng и соавторов изучалась прочность при сжатии стальных трубчатых колонн, заполненных бетоном, модифицированным резиновым порошком и стальными волокнами. Результаты показали, что совместное применение резиновых компонентов и стальных волокон способствует улучшению прочностных и деформационных характеристик материала [3]. В исследованиях M.A. Rahim и соавторов от 0 до 20 % песка заменяли резиной, а в состав бетона вводили 0,5 % стальных волокон. Согласно полученным результатам, введение стальных волокон способствовало повышению прочности бетона при сжатии на 33 %. При увеличении содержания резины до 20 % водопоглощение бетона возрастало до 7,49 % [7]. В исследованиях L.Y. Feng и соавторов при замене 10–20 % мелкого заполнителя резиновыми частицами наблюдалось снижение прочности бетона при сжатии. Однако обработка резинового порошка растворами NaOH и KH-570 способствовала улучшению адгезии между резиной и цементной матрицей, что приводило к повышению прочности бетона при сжатии [14]. Несмотря на проведённые исследования, влияние применения измельчённой резины, полученной из отработанных автомобильных шин, в качестве заполнителя в составе бетона на его механические, физические и эксплуатационные характеристики до настоящего времени изучено

недостаточно. В частности, дополнительного научного исследования требуют вопросы влияния совместного применения резины и стальных волокон на свойства бетона, определения оптимального содержания резины при замене природных заполнителей, а также выбора наиболее эффективных методов предварительной обработки поверхности резиновых гранул.

Целью настоящего исследования является экспериментальное изучение возможности применения измельчённой резины, полученной из отработанных автомобильных шин, в качестве материала для частичной замены крупного заполнителя в составе бетона, а также оценки возможности совместного использования резины и стальных волокон, полученных в результате переработки отработанных шин, в качестве вторичного сырья. Кроме того, исследование направлено на определение влияния указанных компонентов на физико-механические свойства бетона.

Материалы и методы

Цемент: В настоящем научном исследовании был выбран портландцемент типа ЦЕМ I 42,5 Н произведенный АО «Бекабад цемент» Ташкентской области.

Таблица 1. Физико-механические свойства портландцемента

Нормальная густота, %	Сроки схватывания, мин		Истинная плотность, г/см³	Насыпная плотность, кг/м³	Насыпная плотность в уплотненном состоянии, кг/м³	Остаток на сите, %	ПСХ
	начало	окончание					
27	165	285	3.124	1170	1570	8	3296

Таблица 2. Химический состав портландцемента

CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO(свободный)
64.58	21.54	4.63	4.62	1.68	0.63

Таблица 3. Минералогический состав портландцемента

C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
61.54	15.32	4.43	14.04

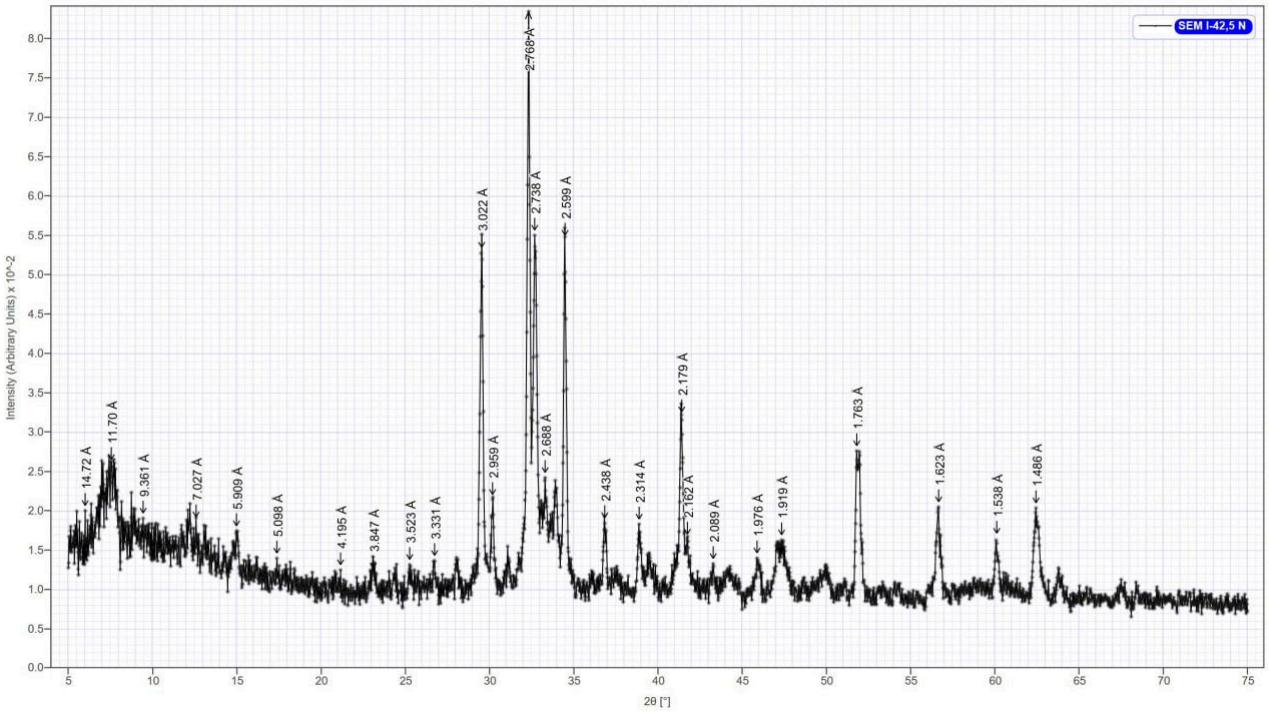


Рисунок 3. Дифрактограмма рентгеновской дифракции (XRD) цемента

Крупный заполнитель: В настоящем исследовании использовался щебень фракции 5–20 мм, полученный в Чиназском районе Ташкентской области.

Таблица 4. Основные физико-механические свойства щебня, используемого в качестве крупного заполнителя для бетона

№	Показатели	Единица измерения	Крупный заполнитель (щебень)
1	Истинная плотность	кг/м³	2600
2	Насыпная плотность	кг/м³	1400
3	Модуль крупности	мм	5-20
4	Пустотность	%	46.2

Таблица 5. Химический состав щебня

SiO_2	K_2O	Na_2O	CaO	MgO	Cl	Al_2O_3	Fe_2O_3	SO_3	Прочие
66.0	3.38	2.27	11.2	1.04	0.028	12.0	2.88	0.209	0.942

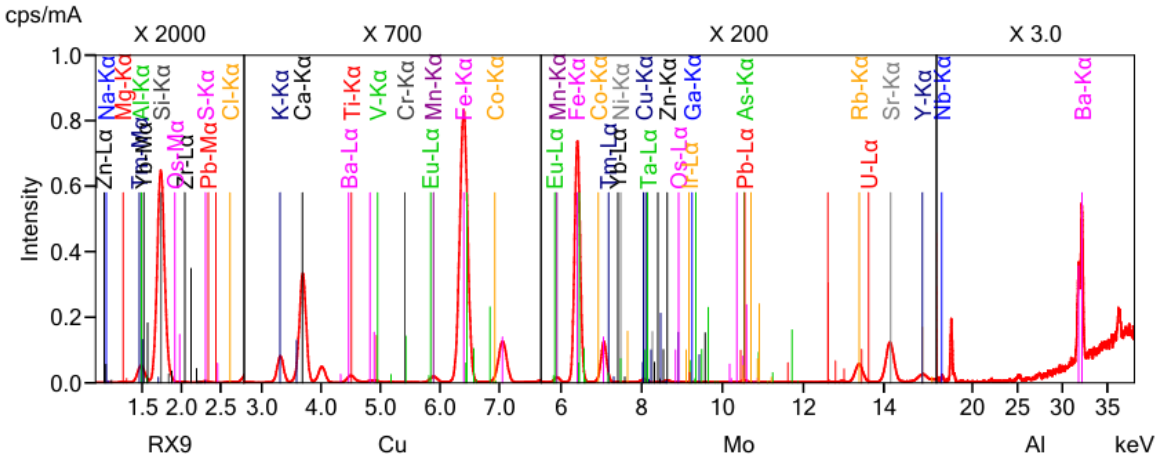


Рисунок 4. Энергодисперсионный рентгеновский спектр щебня (EDS)

Мелкий заполнитель: В настоящем исследовании в качестве мелкого заполнителя использовался природный песок, полученный в Чиназском районе Ташкентской области.

Таблица 6. Основные физико-механические свойства мелкого заполнителя

№	Показатели	Единица измерения	Значение показателей
1	Модуль крупности	-	2.25
3	Истинная плотность	кг/м³	2610
4	Насыпная плотность	кг/м³	1360
5	Пустотность	%	47
6	Содержание пылевидных и глинистых частиц	%	1

Таблица 7. Химический состав песка

SiO_2	K_2O	Na_2O	CaO	MgO	Cl	Al_2O_3	Fe_2O_3	SO_3	Прочие
55.3	2.17	1.69	14.6	2.33	0.021	11.9	5.22	1.36	1.35

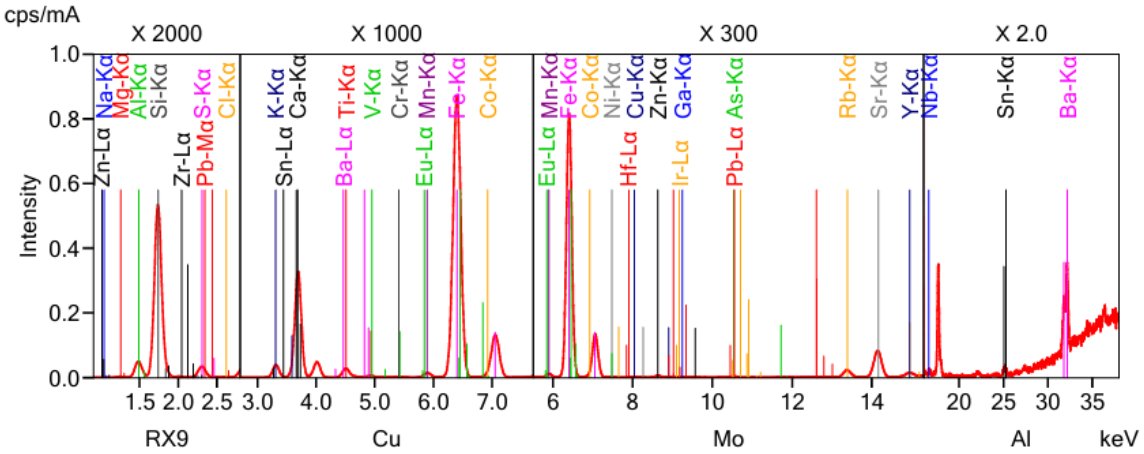


Рисунок 5. Энергодисперсионный рентгеновский спектр образца песка (EDS)

Резиновая крошка: В исследовании использовалась крупно фракционная резиновая крошка фракции 5–20 мм. В качестве стальных волокон применялись стальные проволочные волокна длиной 16-50 мм и диаметром 0,3 мм.

(а) (б) (с)

Рисунок 6. а – Крупно фракционная резиновая крошка; б – металлические проволочные волокна, извлечённые из переработанных шин; с – смесь измельчённой резины и металлической проволоки

Таблица 8. Основные физико-механические свойства резиновой крошки

№	Основные свойства	Единица измерения	Значение показателей
1	Фракция резиновой крошки	мм	5-20
2	Истинная плотность	кг/м³	1100
3	Насыпная плотность	кг/м³	407
4	Пустотность	%	63

Вода: для приготовления бетонной смеси использовалась вода питьевого качества. Применялась вода с показателем pH не ниже 4. Вода не содержала вредных химических и органических примесей, способных отрицательно повлиять на процесс твердения бетона.

Химические добавки: для повышения адгезии между крупными резиновая крошка и цементом, а также с целью снижения расхода цемента в настоящем исследовании использовались химические добавки. В качестве химической добавки применялся суперпластификатор ПКАН-55ТБ, произведённый НИИ «Химические технологии» (г. Ташкент).

Результаты и их обсуждения

В настоящем исследовании в качестве частичной замены крупного заполнителя щебня использовались измельчённые резиновая крошка фракции 5-20 мм в количестве 20 % по объёму. Согласно результатам многочисленных исследований, увеличение содержания резины может оказывать отрицательное влияние на механические свойства бетона. При этом наиболее оптимальным диапазоном содержания резины при замене крупного и мелкого заполнителей считается 5-20 % [2, 3, 7, 10, 14].

В настоящем исследовании изучалось влияние на физико-механические свойства бетона крупноразмерных измельчённых резиновая крошка фракции 5-20 мм, использованных в количестве 20 % по объёму, и металлических проволочных волокон длиной 16-50 мм и диаметром 0,3 мм, добавленных в количестве 0,5 % по объёму. В качестве контрольного образца использовался бетон, не содержащий резиновая крошка (0 % резины). Кроме того, на

основании полученных результатов было проведено сравнительное исследование влияния резиновых крошки и резинометаллических волокон на плотность, прочность и структурные характеристики бетона. Для повышения адгезии между резиной и цементным камнем бетонные образцы, содержащие 20 % резиновая крошка и резинометаллические волокна, были обработаны химической добавкой ПКАН-55ТБ. После этого результаты испытаний механических свойств указанных образцов сравнивались с результатами испытаний контрольного бетона.

Рисунок 7. Результаты испытания бетонной смеси на осадку конуса

Для определения прочности бетона при сжатии были изготовлены кубические образцы размером 100 × 100 × 100 мм. Образцы выдерживали в течение 28 суток при температуре 20 ± 2 °C и относительной влажности не менее 95 %, после чего подвергали испытаниям. В процессе испытаний образцы помещали в гидравлический пресс и подвергали сжатию при скорости нагружения 0,4–0,6 МПа/с. Полученные результаты были проанализированы. Результаты испытаний на прочность при сжатии бетонных образцов в возрасте 3, 7 и 28 суток представлены в таблице 9. Согласно полученным результатам, прочность при сжатии бетона, в котором 20 % крупного заполнителя было заменено крупнофракционной резиновой крошкой, а также бетона, содержащего крупнофракционную резиновую крошку и стальную фибру, в возрасте 28 суток снизилась на 27,08 % и 4,40 % соответственно по сравнению с контрольным бетоном.

Таблица 9. Состав резинобетона и прочность при сжатии

№	Тип состава	Цемент (кг)	Крупная резиновая крошка (кг)	Щебень (кг)	Песок (кг)	Вода (л)	Химическая добавка (кг)	Прочность на сжатие, (Мпа)		
								3 суток	7 суток	28 суток
1	Контрольный образец (0 %)	5.59	0	10.42	6.66	2.19	-	32.6	36.5	43,2
2	Бетон с крупной резиновой крошкой	5.59	0.521	8.33	6.66	2.19	0.095	26.2	30.3	31.5
3	Бетон с крупной резиновой крошкой и стальной фиброй	5.59	0.521	8.33	6.66	2.19	0.095	31.1	34.7	41.3

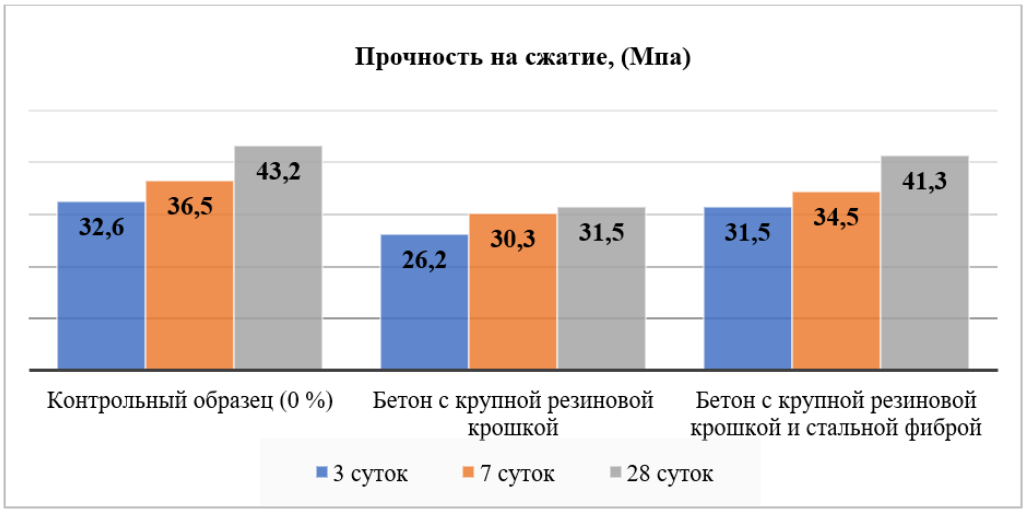


Рисунок 8. Результаты испытаний бетонных образцов на прочность при сжатии

Снижение прочности бетона с добавлением резиновой крошки при сжатии в проведённом эксперименте можно объяснить относительно слабой адгезией между цементным камнем и резиной. Добавление резины не обеспечивает такой же способности воспринимать нагрузку, как твёрдые минеральные заполнители. В результате при нагружении происходит неравномерное распределение напряжений в структуре бетона и развитие микротрещин, что приводит к снижению его прочности при сжатии. В составе бетона, в котором резиновая крошка и стальные проволочные волокна использовались совместно, применение суперпластификатора ПКАН-55ТБ способствовало улучшению сцепления между цементным камнем и резиной, а стальные волокна повышали сопротивление бетона образованию трещин и препятствовали их дальнейшему развитию. Добавление стальных проволочных волокон способствует сохранению целостности внутренней структуры бетона и ограничивает развитие трещин под воздействием нагрузки. В целом полученные экспериментальные результаты показали, что замена 20 % крупного заполнителя резиновой крошкой приводит к снижению прочности бетона при сжатии, однако совместное использование резиновой крошки и стальных проволочных волокон позволяет существенно уменьшить это негативное влияние.

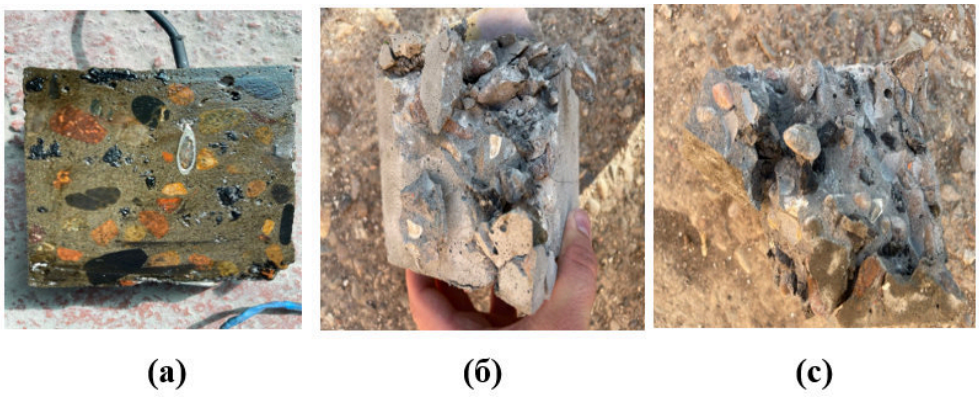


Рисунок 9. а – внутренняя структура кубического образца и распределение резиновой крошки после разрушения; б -характер разрушения бетона с резиновой крошкой и стальными проволочными волокнами; с -характер разрушения бетона с крупной резиновой крошкой

Результаты настоящего исследования показывают, что частичная замена природных минеральных заполнителей в составе бетона вторичным сырьём, в том числе резиновыми отходами, а также применение стальных волокон оказывают существенное влияние на физико-механические свойства бетона. На рисунке -10 представлены результаты ряда экспериментальных исследований различных авторов, посвящённых прочности при сжатии бетонов, модифицированных резиновой крошкой и армированных стальными волокнами. Полученные результаты сопоставлены с результатами настоящего исследования.

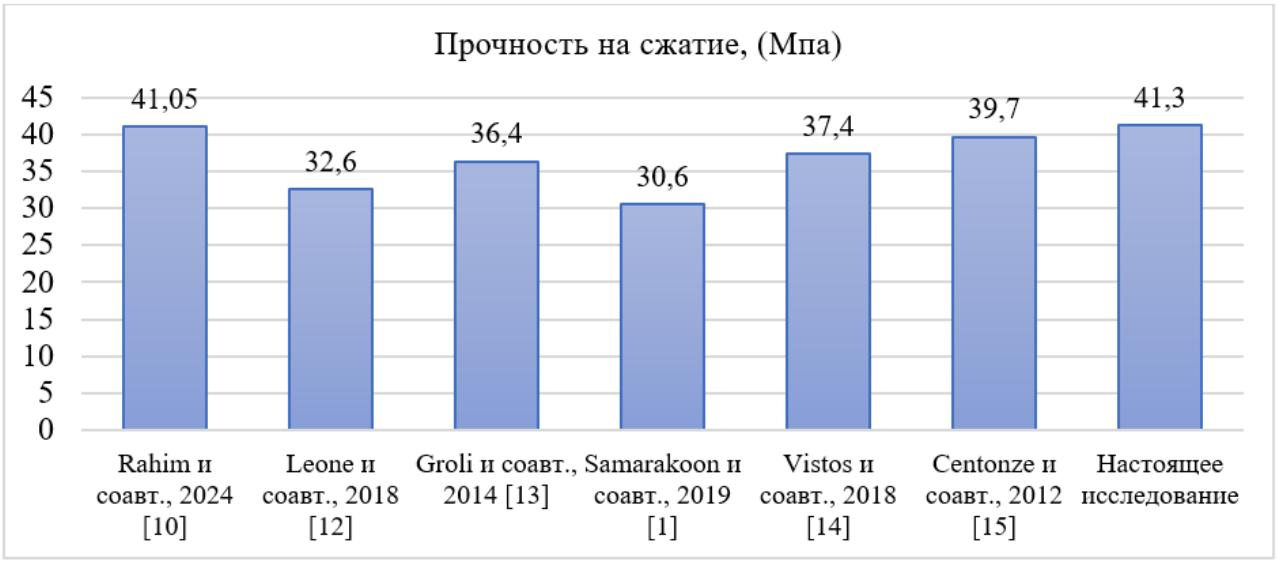


Рисунок 10. Сравнительный анализ прочности бетонных образцов на сжатие по результатам различных исследований

Заключение

По результатам экспериментальных исследований установлено, что частичная замена крупного заполнителя в составе бетона резиновой крошкой, полученной из отработанных автомобильных шин, в количестве до 20 % по объёму оказывает существенное влияние на микроструктуру и физико-механические свойства бетона. Согласно полученным экспериментальным данным, снижение прочности образцов бетона, в которых 20 % крупного заполнителя было заменено резиновой крошкой, по сравнению с контрольным бетоном составило 19,63 % через 3 суток, 16,99 % через 7 суток и 27,08 % через 28 суток. В то же время в образцах бетона, содержащих крупную резиновую крошку и стальные проволочные волокна, снижение прочности при сжатии по сравнению с контрольным бетоном составило 3,37 % через 3 суток, 5,48 % через 7 суток и 4,40 % через 28 суток. Полученные результаты свидетельствуют о том, что добавление стальных проволочных волокон позволяет существенно компенсировать потерю прочности, возникающую при замене 20 % крупного заполнителя резиновой крошкой. Кроме того, установлено, что введение в бетонную смесь суперпластификатора ПКАН-55ТБ способствует улучшению сцепления между цементным камнем и резиновой крошкой и позволяет повысить прочность бетона при сжатии до уровня контрольного образца. Использование резиновой крошки, полученной из отработанных автомобильных шин, при производстве бетона представляется целесообразным для инженерных сооружений, спортивных площадок, а также конструкций, предназначенных для

снижения воздействия вибраций и ударных нагрузок. Для таких конструкций важное значение имеют эксплуатационные характеристики, в частности эффективность звуко- и теплоизоляции.

Список литературы

1. Samarakoon, S.M. Mechanical performance of concrete made of steel fibers from tire waste / S.M. Samarakoon, P. Ruben, J.W. Pedersen, L. Evangelista // Case Studies in Construction Materials. – 2019. – T. 11. – Art. 00259. – DOI: 10.1016/j.cscm.2019.e00259.
2. Moasas, A.M. A worldwide development in the accumulation of waste tires and its utilization in concrete as a sustainable construction material / A.M. Moasas, M.N. Amin, K. Khan, W. Ahmad, M.N. A. Al-Hashem, A.F. Deifalla, A. Ahmad // Case Studies in Construction Materials. – 2022. – T. 17. – Art. 01677. – DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e01677.
3. Amin, M.N. Application of waste recycle tire steel fibers as a construction material in concrete / M.N. Amin, K. Khan, S. Nazar, A.F. Deifalla // Reviews on Advanced Materials Science. – 2023. – T. 62. – Art. 20220319. – DOI: 10.1515/rams-2022-0319.
4. Nunton, J.A. A review of the mechanical behavior of concrete with the addition of steel fibers from recycled tires / J.A. Nunton, J.P. Portocarrero, S.P. Muñoz // Ingeniería y Competitividad. – 2022. – T. 24, № 2. – Art. 30611741. – DOI: 10.25100/iyc.v24i2.11741.
5. Han, K. Application of waste tire recycled steel fibers in concrete for an eco-friendly and sustainable construction approach in China / K. Han // Materials Research Express. – 2025. – T. 12. – Art. 045701. – DOI: 10.1088/2053–1591/adc9fd.
6. Zia, A. A comprehensive review of incorporating steel fibers of waste tires in cement composites and its applications / A. Zia, Z. Pu, I. Holly, T. Umar, M.A. U.R. Tariq, M. Sufian // Materials. – 2022. – T. 15. – Art. 7420. – DOI: 10.3390/ma15217420.
7. Valente, M. Rubber/crete: mechanical properties of scrap to reuse tire-derived rubber in concrete; a review / M. Valente, A. Sibai // Journal of Applied Biomaterials & Functional Materials. – 2019. – T. 17, № 1. – P. 1–8. – DOI: 10.1177/2280800019835486.
8. Chicoma, A. Influence of the physical and mechanical properties of concrete by adding rubber powder and silica fume / A. Chicoma, R. Quiroz, S. Muñoz, L. Villena // Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering. – 2023. – T. 32, № 1. – P. 205–223. – DOI: 10.5755/j01.sace.32.1.31964.
9. Deng, Y. Axial performance of steel fiber-reinforced rubberized concrete-filled circular tubular columns / Y. Deng, J.-F. Liang, W. Li // Advances in Materials Science and Engineering. – 2021. – T. 2021. – Art. 6678802. – P. 1–8. – DOI: 10.1155/2021/6678802.
10. Rahim, M.A. The mechanical properties of crumb rubber steel fiber concrete (CRSFC) / M.A. Rahim, S.N. A. Ramli, S. Salehuddin, N.M. Ibrahim, A. Ayob, N.L. Rahim // Jurnal Teknologi. – 2024. – T. 86, № 5. – P. 69–75. – DOI: 10.11113/jurnalteknologi.v86.20951.
11. Feng, L.-Y. Effect of waste tire rubber particles on concrete abrasion resistance under high-speed water flow / Ling-Yun Feng, Ai-Jiu Chen, Han-Dong Liu // International Journal of Concrete Structures and Materials. – 2021. – T. 15. – DOI: 10.1186/s40069-021-00475-8.

12. Leone, M. Fiber-reinforced concrete with low content of recycled steel fiber: shear behavior / M. Leone, G. Centonze, D. Colonna, F. Micelli, M.A. Aiello // Construction and Building Materials. – 2018. – T. 161. – P. 141–155. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.101.
13. Groli, G. Cracking performance of SCC reinforced with recycled fibres – an experimental study / G. Groli, A. Pérez Caldentey, A.G. Soto // Structural Concrete. – 2014. – T. 15. – P. 136–153. – DOI: 10.1002/suco.201300008.
14. Vistos, L. Hybrid industrial/recycled SFRC: experimental analysis and design / L. Vistos, D. Galladini, H. Xargay, A. Caggiano, P. Folino, E. Martinelli // Proceedings of Italian Concrete Days. – Cham: Springer, 2018. – T. 10. – P. 98–112. – DOI: 10.1007/978-3-319-78936-1_8.
15. Centonze, G. Steel fibers from waste tires as reinforcement in concrete: a mechanical characterization / G. Centonze, M. Leone, M.A. Aiello // Construction and Building Materials. – 2012. – T. 36. – P. 46–57. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.085.

Статья поступила в редакцию: 09.11.2026
Статья принята к публикации: 15.11.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 69.05:69.059.7

DOI: 10.32743/UniTech.2026.152.11.23734

Матричный алгоритм поточной организации реконструкции промышленного предприятия и его программная реализация

Ходжаева Шахноза Назарбаевна
докторант, PhD
Ташкентский архитектурно-строительный университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: Shaxnoza1711@yandex.com

Matrix algorithm for flow-based organization of industrial enterprise reconstruction and its software implementation

Khodjayeva Shakhnoza Nazarbayevna
PhD Candidate
Tashkent Architectural and Civil Engineering University
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

Цель исследования — разработать и обосновать матричный алгоритм календарного планирования реконструкции промышленного предприятия поточным методом с учётом организационно-технологических перерывов между смежными работами. Методы: построена детерминированная модель, в которой неизвестными являются моменты начала и окончания работ на захватках; решение получено рекуррентным обходом матрицы, его оптимальность по критерию общей продолжительности доказана индукцией; реализация выполнена на языке Python с интерфейсом Tkinter. Результаты: для контрольного примера из четырёх захваток и пяти работ получены общая продолжительность 19,5 сут., сумма фактических перерывов 7,5 сут. и коэффициент плотности графика 0,85; ведущим процессом определена четвёртая работа. На условном примере 3×3 выравнивание продолжительностей работ сократило срок с 16 до 13 сут. Программа формирует матрицы начала, окончания и перерывов, календарный график и циклограмму, что позволяет проверять расчёт. Выводы: алгоритм точен для заданной последовательности работ, выявляет потери времени в потоке и может применяться при организационно-технологическом проектировании реконструкции. Модель не охватывает параллельные бригады, вероятностные продолжительности и ресурсные ограничения.

Библиографическое описание: Ходжаева Ш.Н. Матричный алгоритм поточной организации реконструкции промышленного предприятия и его программная реализация // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23734

Abstract

The aim of the study is to develop and substantiate a matrix algorithm for scheduling the reconstruction of an industrial enterprise by the flow method, taking into account organizational and technological breaks between adjacent works. Methods: a deterministic model is formulated in which the unknowns are the start and finish times of works in work zones; the solution is obtained by a recurrent traversal of the matrix, and its optimality with respect to total duration is proved by induction; the algorithm is implemented in Python with a Tkinter interface. Results: for a control example with four zones and five works, the total duration is 19.5 days, the sum of actual breaks is 7.5 days and the schedule density coefficient is 0.85; the fourth work is identified as the leading process. In a conditional 3×3 example, equalizing work durations reduced the duration from 16 to 13 days. The program builds start, finish and break matrices, a calendar chart and a cyclogram that make it possible to verify the calculation. Conclusions: the algorithm is exact for a given sequence of works, helps to diagnose time losses in the flow and can be used in the organizational and technological design of reconstruction. The model does not cover parallel crews, stochastic durations or resource constraints.

Ключевые слова: реконструкция промышленного предприятия, поточный метод, матричный алгоритм, захватка, циклограмма, плотность графика, календарное планирование.

Keywords: reconstruction of an industrial enterprise, flow method, matrix algorithm, work zone, cyclogram, schedule density, calendar planning.

Введение

Реконструкция действующих промышленных предприятий отличается от нового строительства стеснёнными условиями, необходимостью увязки строительных, монтажных и специальных работ с технологическим процессом производства и жёсткими сроками, установленными подрядным договором. При этом строительная система вынуждена адаптироваться к функционирующей производственной системе, а не наоборот [4], а стеснённость рассматривается как совокупность пространственных, временных и ресурсных ограничений, влияющих на выбор организационно-технологических решений [6, 2]. В этих условиях ключевой задачей организационно-технологического проектирования, рассматривающего строительство как сложную систему взаимоувязанных процессов [3], становится выбор такой последовательности работ, при которой имеющиеся ресурсы обеспечивают завершение объекта в установленный срок.

Поточный метод, основанный на делении объекта на захватки и ритмичном движении специализированных бригад [5], позволяет добиться равномерной загрузки бригад и машин, однако при реконструкции преобладают неритмичные потоки, в которых ритмы бригад не равны и не кратны друг другу. Чтобы бригады работали без простоев, между смежными работами на захватках приходится допускать организационные и технологические перерывы; чем они короче, тем полнее совмещение работ и меньше общий срок реконструкции. Оптимизация поточной организации строительства рассматривалась, в частности, по критерию минимальной себестоимости работ [1]; в настоящей работе критерием служит общая продолжительность.

Классическими средствами календарного планирования служат ленточный график Ганта [8] и сетевые модели метода критического пути [12]. Задачи упорядочения работ на последовательно расположенных ресурсах изучаются в теории расписаний: известны правило Джонсона для двух станков [11], результаты о вычислительной сложности задач flow shop [9] и обобщающие монографии [14]. Для линейных и повторяющихся строительных проектов предложены специализированные методы планирования [16, 10], а проблемы применения метода линии баланса рассмотрены в работе [7].

Вместе с тем для расчёта реконструкции по заданным продолжительностям работ на захватках с учётом минимальных организационно-технологических перерывов востребованы простой алгоритм, допускающий ручную проверку, и показатели, позволяющие диагностировать потери времени в потоке. Цель исследования — разработать матричный алгоритм календарного планирования реконструкции промышленного предприятия поточным методом, доказать его оптимальность по критерию общей продолжительности и реализовать его в виде программного модуля.

Материалы и методы

Исходными данными служат сроки, установленные подрядным договором, проектно-сметная документация, сведения о составе бригад, нормы выработки, наличие строительных машин и технологические карты. На их основе составляют ведомость объёмов работ, выбирают способы производства работ, определяют состав бригад, сменность и продолжительность работ. Численность бригады находят как отношение объёма работ к сменной выработке:

$$N_{\text{бр}} = \frac{V}{B} \tag{1}$$

где V — объём работ в натуральных или стоимостных измерителях; B — сменная выработка бригады. Продолжительность работы, выполняемой бригадой, и продолжительность механизированной работы определяют соответственно по формулам:

$$T_{\text{р}} = \frac{V}{B_{\text{бр}} \cdot n} \tag{2}$$

$$T_{\text{р.мех}} = \frac{V}{\Pi_{\text{маш}} \cdot k \cdot n} \tag{3}$$

где n — число смен в сутки; $B_{бр}$ — сменная выработка бригады; $П_{маш}$ — сменная производительность машины; k — число машин.

Математическая модель. Объект реконструкции разделён на m захваток, на каждой из которых в одинаковой технологической последовательности выполняется n работ. Продолжительность j-й работы на i-й захватке задана элементом d_{ij} матрицы D размером $m \times n$, минимальный организационно-технологический перерыв между $(j-1)$-й и j-й работами на i-й захватке — элементом r_{ij} матрицы R, причём $r_{i1} = 0$. Неизвестными являются моменты начала s_{ij} и окончания f_{ij} работ. Принимается, что каждая работа выполняется непрерывно и без деления; продолжительности детерминированы и неотрицательны; технологический

порядок работ на захватке сохраняется; одна работа не выполняется одновременно на двух захватках; начало отсчёта времени равно нулю. Ограничения модели имеют вид $s_{ij} \geq f_{i,j-1} + r_{ij}$ и $s_{ij} \geq f_{i-1,j}$, а критерий — минимум общей продолжительности $T = f_{mn}$. Поскольку последовательность работ задана, бинарные переменные не требуются, и задача является линейной со специальной структурой.

Благодаря этой структуре решение находится обходом матрицы: $s_{11} = 0$; в первом столбце $s_{i1} = f_{i-1,1}$; в первой строке $s_{1j} = f_{1,j-1} + r_{1j}$; для остальных клеток

$$s_{ij} = max\left(f_{i,j-1} + r_{ij} ; f_{i-1,j}\right) \quad (4)$$

$$f_{ij} = s_{ij} + d_{ij} \quad (5)$$

Фактический перерыв между работами определяется как

$$g_{ij} = s_{ij} - f_{i,j-1} \quad (6)$$

при $g_{i1} = 0$. Величина r_{ij} — заданное минимальное требование, а g_{ij} — результат расчёта, который может превышать r_{ij} из-за вертикального ограничения. Интегральные показатели включают сумму продолжительностей работ Σd, сумму фактических перерывов Σg и суммарную продолжительность j-й работы по всем захваткам T_j. Плотность графика оценивают коэффициентом

$$\rho = \frac{\Sigma d}{\Sigma d + \Sigma g} \quad (7)$$

при $0 < \rho \leq 1$: в отсутствие перерывов $\rho = 1$, с ростом перерывов значение ρ убывает. Ведущим процессом названа работа с наибольшей суммой T_j; критическими — захватки, на которых для пары смежных работ достигается минимальный фактический перерыв. Сумма $\Sigma d + \Sigma g$ не совпадает с календарным сроком T, который показывает момент завершения всего комплекса на оси времени.

Программная реализация выполнена на языке Python; интерфейс построен на библиотеке Tkinter [15], изображения высокого разрешения сохраняются с помощью Pillow [13]. Пользователь задаёт число захваток и работ и направление потока (горизонтальное, вертикальное вниз или вверх); для вертикальных режимов матрицы транспонируются (в режиме «вверх» строки предварительно разворачиваются), после расчёта результаты возвращаются в исходную ориентацию. Продолжительности вводятся неотрицательными числами без пустых клеток, пустая клетка матрицы перерывов трактуется как $r_{ij} = 0$. Результаты выводятся последовательно по столбцам, в виде матриц S, F и G, итоговых показателей, календарного графика и циклограммы; экспорт возможен в форматах SVG, PNG, JPEG, PS и EPS.

Верификация включает алгебраические проверки: $f_{ij} = s_{ij} + d_{ij}$; $s_{ij} \geq f_{i,j-1}$; $s_{ij} \geq f_{i-1,j}$; пересчёт g_{ij}; равенство $\Sigma = \Sigma d + \Sigma g$; условие $0 < \rho \leq 1$; совпадение координат календарного графика и циклограммы с матрицами.

Результаты и обсуждения

Оптимальность алгоритма. Утверждение: значения s_{ij} и f_{ij}, найденные по формулам (4) и (5), являются наиболее ранними среди всех допустимых календарных планов, следовательно, $T = f_{mn}$ минимально. Доказательство ведётся индукцией по клеткам. Для клетки (1, 1) значение $s_{11} = 0$ минимально возможно. Пусть для всех клеток, предшествующих клетке (i, j), алгоритм дал наиболее ранние моменты. В любом допустимом плане работа (i, j) должна начаться не раньше $f_{i,j-1} + r_{ij}$ и не раньше $f_{i-1,j}$, а эти величины в допустимом плане не меньше значений алгоритма. Значит, меньшее значение, чем s_{ij} из (4), выбрать нельзя, и f_{ij} также минимально. По индукции утверждение верно для всех клеток, включая f_{mn}. Таким образом, расчётная схема является не эвристикой, а точным алгоритмом для задач данного класса.

Контрольный пример. Рассмотрим объект из $m = 4$ захваток и $n = 5$ работ при $r_{ij} = 0$. Продолжительности работ (сут.) приведены в таблице 1.

Таблица 1. Продолжительности работ

Захватка	Работа 1	Работа 2	Работа 3	Работа 4	Работа 5
I	1	2	2	2	1,5
II	1,5	2	2,5	3	2
III	1	2	2	3	1,5
IV	1,5	2	2,5	4	2
Σ по работе	5	8	9	12	7

Расчёт по формулам (4) и (5) даёт моменты начала и окончания работ, приведённые в таблице 2.

Таблица 2. Моменты начала и окончания работ (начало–окончание), сут

Захватка	Работа 1	Работа 2	Работа 3	Работа 4	Работа 5
I	0–1	1–3	3–5	5–7	7–8,5
II	1–2,5	3–5	5–7,5	7,5–10,5	10,5–12,5
III	2,5–3,5	5–7	7,5–9,5	10,5–13,5	13,5–15
IV	3,5–5	7–9	9,5–12	13,5–17,5	17,5–19,5

Общая продолжительность реконструкции $T = f_{45} = 19{,}5$ сут. Тот же результат даёт суммирование продолжительностей и перерывов по внешнему контуру матрицы (1 + 2 + 2 + 0,5 + 2 + 5 + 1,5 + 2 + 1,5 + 2 = 19,5 сут.), что служит независимой проверкой. Наибольшую суммарную продолжительность имеет работа 4 (12 сут.), поэтому она является ведущим процессом. Сумма продолжительностей $\Sigma d = 41$ сут., сумма фактических перерывов $\Sigma g = 7{,}5$ сут., плотность графика по формуле (7) составляет $\rho = 41 / 48{,}5 \approx 0{,}85$. Циклограмма контрольного примера показана на рисунке 1.

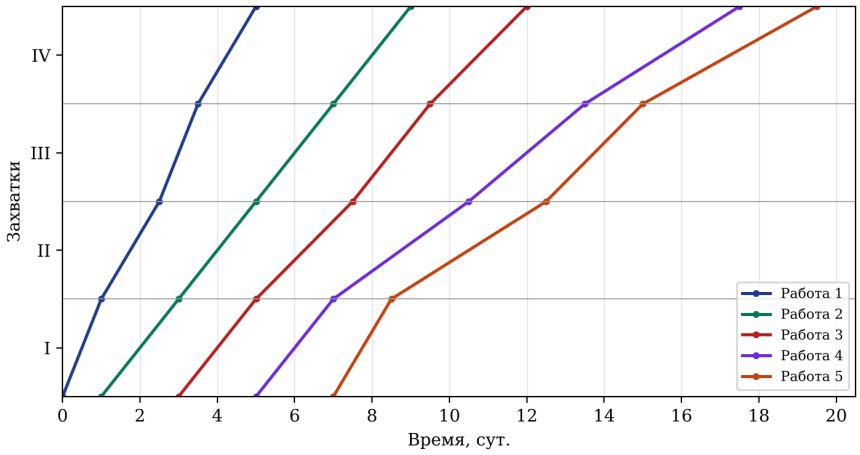


Рисунок 1. Циклограмма контрольного примера

Влияние выравнивания продолжительностей иллюстрирует условный пример с матрицей 3×3: приведение продолжительностей работ к одинаковым значениям вдоль нисходящих диагоналей сокращает суммарный срок с 16 до 13 сут., то есть примерно на 19 %. Частичное выравнивание также сокращает срок, хотя и не обнуляет все перерывы.

Обсуждение

При rij = 0 соотношение (4) совпадает с известной рекуррентной формулой времени завершения в перестановочной задаче flow shop, где захватки играют роль заданий, а работы — роль станков [14]. Это объясняет точность алгоритма: для фиксированной последовательности задача сводится к поиску наибольшего пути в прямоугольной сетке. Отличие предложенной модели состоит во введении минимальных перерывов rij как временных ограничений между смежными работами, а также в диагностических показателях — плотности графика, ведущем процессе и критических захватках. Задача выбора порядка, напротив, для трёх и более станков относится к труднорешаемым [9], поэтому в алгоритме порядок задан технологией. В качестве источника тестовых матриц продолжительностей для дальнейшей проверки реализации могут использоваться стандартные наборы задач [17].

Термин «оптимизация» в программе следует понимать как выявление ведущего процесса и организационных перерывов с оценкой возможности их сокращения, а не как поиск глобального минимума независимым оптимизатором. Модель не охватывает несколько параллельных бригад на одном виде работ, свободную оптимизацию порядка работ, прерывание работ во времени, вероятностный или интервальный характер продолжительностей и дополнительные ограничения по материалам, технике и финансам. Эти направления целесообразно развивать с применением смешанного целочисленного программирования, стохастических моделей и многоресурсного планирования.

Заключение

1. Предложен матричный алгоритм определения продолжительности реконструкции промышленного предприятия при поточной организации работ, учитывающий организационно-технологические перерывы между смежными работами.

2. Построена детерминированная математическая модель, получено рекуррентное решение и доказана его оптимальность по критерию общей продолжительности для заданной последовательности работ.

3. Введены коэффициент плотности графика, ведущий процесс и критические захватки, позволяющие диагностировать потери времени в потоке; на контрольном примере из четырёх захваток и пяти работ получены общая продолжительность 19,5 сут. и плотность графика 0,85.

4. Разработан программный модуль, формирующий матрицы начала, окончания и перерывов, календарный график и циклограмму и обеспечивающий проверку результатов. Практическая применимость метода требует дальнейшей проверки на данных реальных объектов реконструкции.

Список литературы

1. Балабан И.С. Оптимизация поточной организации строительства по критерию минимальной себестоимости работ: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.23.08. – СПб.: СПбГАСУ, 1998.
2. Бельчевский Р.О. Классификация стесненных условий, влияющих на выбор организационно-технологических систем по возведению зданий и сооружений // Экономика строительства. – 2023. – № 4. – С. 126–130.
3. Гусаков А.А. Системотехника строительства. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1993. – 368 с.
4. Джалилов Ф.Ф. Разработка методов формирования организационно-технологических решений по реконструкции действующих предприятий: дис. … д-ра техн. наук: 05.23.08. – М.: МИСИ им, 1991. – 412 с.
5. Дикман Л.Г. Организация, планирование и управление строительным производством: практическое пособие. – М.: Высшая школа, 1976. – 427 с.
6. Киселев А.А., Гусакова Е.А., Беляев А.В. Понятие стесненности в нормативных базах строительного производства // Вестник МГСУ. – 2011. – № 8. – С. 427–429.
7. Arditi D., Tokdemir O.B., Suh K. Challenges in line-of-balance scheduling // Journal of Construction Engineering and Management. – 2002. – T. 128, № 6. – P. 545–556. – DOI: 10.1061/(ASCE)0733–9364(2002)128:6(545.
8. Gantt H.L. Organizing for Work. – New York: Harcourt, Brace and Howe, 1919.
9. Garey M.R., Johnson D.S., Sethi R. The complexity of flowshop and jobshop scheduling // Mathematics of Operations Research. – 1976. – T. 1, № 2. – P. 117–129. – DOI: 10.1287/moor. 1.2.117.
10. Harris R.B., Ioannou P.G. Scheduling projects with repeating activities // Journal of Construction Engineering and Management. – 1998. – T. 124, № 4. – P. 269–278. – DOI: 10.1061/(ASCE)0733–9364(1998)124:4(269.
11. Johnson S.M. Optimal two- and three-stage production schedules with setup times included // Naval Research Logistics Quarterly. – 1954. – T. 1, № 1. – P. 61–68. – DOI: 10.1002/nav. 3800010110.

12. Kelley J.E., Walker M.R. Critical-path planning and scheduling // Proceedings of the Eastern Joint Computer Conference. – 1959. – P. 160–173. – DOI: 10.1145/1460299.1460318.
13. Pillow Documentation [Электронный ресурс]. URL: https://pillow.readthedocs.io (дата обращения: 04.11.2026).
14. Pinedo M.L. Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems. – 5th ed. – Cham: Springer, 2016. – DOI: 10.1007/978-3-319-26580-3.
15. Python Software Foundation. tkinter – Python interface to Tcl/Tk [Электронный ресурс]. // Python 3 Documentation. URL: https://docs.python.org/3/library/tkinter.html (дата обращения: 04.11.2026).
16. Selinger S. Construction planning for linear projects // Journal of the Construction Division. – 1980. – T. 106, № 2. – P. 195–205.
17. Taillard E. Benchmarks for basic scheduling problems // European Journal of Operational Research. – 1993. – T. 64, № 2. – P. 278–285. – DOI: 10.1016/0377–2217(93)90182-M.

References

1. Balaban I.S. Optimizatsiya potochnoy organizatsii stroitel'stva po kriteriyu minimal'noy sebestoimosti rabot [Optimization of flow-based organization of construction by the criterion of minimum cost of works]: Abstract of Cand. Sci. (Eng.) dissertation. – St. Petersburg: SPbGASU, 1998. (In Russ.).
2. Bel'chevskiy R.O. Klassifikatsiya stesnennykh usloviy, vliyayushchikh na vybor organizatsionno-tekhnologicheskikh sistem po vozvedeniyu zdaniy i sooruzheniy [Classification of constrained conditions affecting the choice of organizational and technological systems for the erection of buildings and structures] // Ekonomika stroitel'stva. – 2023. – No. 4. – P. 126–130. (In Russ.).
3. Gusakov A.A. Sistemotekhnika stroitel'stva [Systems engineering of construction]. – 2nd ed. – Moscow: Stroyizdat, 1993. – 368 P. (In Russ.).
4. Dzhalilov F.F. Razrabotka metodov formirovaniya organizatsionno-tekhnologicheskikh resheniy po rekonstruktsii deystvuyushchikh predpriyatiy [Development of methods for forming organizational and technological solutions for the reconstruction of operating enterprises]: Doctoral thesis in Engineering Science. – Moscow: MISI named after V.V. Kuybyshev, 1991. – 412 P. (In Russ.).
5. Dikman L.G. Organizatsiya, planirovanie i upravlenie stroitel'nym proizvodstvom [Organization, planning and management of construction production]. – Moscow: Vysshaya shkola, 1976. – 427 P. (In Russ.).
6. Kiselev A.A., Gusakova E.A., Belyaev A.V. Ponyatie stesnennosti v normativnykh bazakh stroitel'nogo proizvodstva [The concept of constrained conditions in the regulatory framework of construction production] // Vestnik MGSU. – 2011. – No. 8. – P. 427–429. (In Russ.).
7. Arditi D., Tokdemir O.B., Suh K. Challenges in line-of-balance scheduling // Journal of Construction Engineering and Management. – 2002. – Vol. 128, No. 6. – P. 545–556. – DOI: 10.1061/(ASCE)0733–9364(2002)128:6(545.

8. Gantt H.L. Organizing for Work. – New York: Harcourt, Brace and Howe, 1919.
9. Garey M.R., Johnson D.S., Sethi R. The complexity of flowshop and jobshop scheduling // Mathematics of Operations Research. – 1976. – Vol. 1, No. 2. – P. 117–129. – DOI: 10.1287/moor.1.2.117.
10. Harris R.B., Ioannou P.G. Scheduling projects with repeating activities // Journal of Construction Engineering and Management. – 1998. – Vol. 124, No. 4. – P. 269–278. – DOI: 10.1061/(ASCE)0733–9364(1998)124:4(269.
11. Johnson S.M. Optimal two- and three-stage production schedules with setup times included // Naval Research Logistics Quarterly. – 1954. – Vol. 1, No. 1. – P. 61–68. – DOI: 10.1002/nav.3800010110.
12. Kelley J.E., Walker M.R. Critical-path planning and scheduling // Proceedings of the Eastern Joint Computer Conference. – 1959. – P. 160–173. – DOI: 10.1145/1460299.1460318.
13. Pillow Documentation [Электронный ресурс]. – URL: https://pillow.readthedocs.io (accessed: 04.11.2026).
14. Pinedo M.L. Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems. – 5th ed. – Cham: Springer, 2016. – DOI: 10.1007/978-3-319-26580-3.
15. Python Software Foundation. Python Software Foundation. tkinter – Python interface to Tcl/Tk [Электронный ресурс]. // Python 3 Documentation. – URL: https://docs.python.org/3/library/tkinter.html (accessed: 04.11.2026).
16. Selinger S. Construction planning for linear projects // Journal of the Construction Division. – 1980. – Vol. 106, No. 2. – P. 195–205.
17. Taillard E. Benchmarks for basic scheduling problems // European Journal of Operational Research. – 1993. – Vol. 64, No. 2. – P. 278–285. – DOI: 10.1016/0377–2217(93)90182-M.

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

Статья поступила в редакцию: 08.11.2026
Статья принята к публикации: 20.11.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 621.373.5:620.92

Влияние показателей качества электрической энергии на работу индукционных печей на Каршинском ремонтном заводе

Бейтуллаева Румия Хамидуллаевна
доц.
Каршинский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Карши
ORCID:0000-0001-7648-4396
E-mail: beytullaevar@mail.ru

Ражабов Жавохир Тулкин угли
магистр Каршинский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Карши

Жураева Мадина Жамшид кизи
магистр Каршинский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Карши

The impact of power quality parameters on the operation of induction furnaces at the Karshi repair plant

Beytullaeva Rumiya Khamidullaevna
Associate professor
Karshi State Technical University
Uzbekistan, Karshi

Rajabov Javohir Tulkin ugli
Master's degree holder Karshi State Technical University
Uzbekistan, Karshi

Juraeva Madina Jamshid kizi
Master's degree holder, Karshi State Technical University
Uzbekistan, Karshi

Аннотация

В статье рассматривается влияние показателей качества электрической энергии на эксплуатационные характеристики индукционных печей, установленных в литейном цехе Каршинского ремонтного завода. В качестве объекта исследования выбраны тигельные индукционные печи марки ИТП мощностью 70 кВт, работающие при напряжении 380 В и

Библиографическое описание: Бейтуллаева Р.Х., Ражабов Ж.Т.У., Жураева М.Ж. кизи Влияние показателей качества электрической энергии на работу индукционных печей на Каршинском ремонтном заводе // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23787

частоте питающей сети 50 Гц. Рассмотрены особенности работы индукционных печей, основанные на принципе электромагнитной индукции, а также характерные изменения электрических параметров в процессе плавки металлов. Выполнен расчёт основных показателей качества электроэнергии, включая активную, реактивную и полную мощности, токовую нагрузку, отклонение напряжения, коэффициент несимметрии напряжений, коэффициент несинусоидальности тока и отклонение частоты. Особое внимание уделено влиянию высших гармоник, колебаний напряжения и снижения коэффициента мощности на надёжность работы электрооборудования. На основании проведённых расчётов определены потенциальные проблемы электроснабжения индукционных печей и предложены технические мероприятия по повышению качества электроэнергии, снижению дополнительных потерь и обеспечению устойчивой работы оборудования.

Abstract

The article examines the influence of electric power quality indicators on the operational characteristics of induction furnaces installed in the foundry shop of the Karshi Repair Plant. Crucible induction furnaces of the ITP brand with a power of 70 kW, operating at a voltage of 380 V and a supply network frequency of 50 Hz, were selected as the object of study. The features of the operation of induction furnaces based on the principle of electromagnetic induction, as well as characteristic changes in electrical parameters during metal melting, are considered. The main electric power quality indicators were calculated, including active, reactive, and apparent power, current load, voltage deviation, voltage unbalance factor, current non-sinusoidality factor, and frequency deviation. Particular attention is paid to the influence of higher harmonics, voltage fluctuations, and a decrease in the power factor on the reliability of electrical equipment operation. On the basis of the performed calculations, potential problems in the power supply of induction furnaces were identified, and technical measures were proposed to improve electric power quality, reduce additional losses, and ensure stable operation of the equipment.

Ключевые слова: индукционная печь, качество электрической энергии, активная мощность, реактивная мощность, коэффициент мощности, высшие гармоники, несинусоидальность напряжения, несимметрия напряжений, электромагнитная индукция, энергоэффективность.

Keywords: induction furnace, electric power quality, active power, reactive power, power factor, higher harmonics, voltage non-sinusoidality, voltage unbalance, electromagnetic induction, energy efficiency.

Введение

Каршинский ремонтный завод это промышленное предприятие города Карши специализируется на производстве и ремонте селькохозяйственной техники и металлообработке. Основная деятельность заключается в производстве и продаже запасных частей для сельскохозяйственной техники, ремонт двигателей и агрегатов, металлообработка, сборка селькохозяйственной техники и тракторов включая модели с GPS и автопилотов.

Индукционные печи установлены в литейном цехе завода и является завода и является основным оборудование цеха (они работают по принципу электромагнитной индукции и используются для плавки чёрных металлов (чугуна и стали) и цветных металлов (медь, алюминий). [1]

Материалы и методы

В литейном цеху завода установлена тигельная печь марки ИТП, мощностью 70 кВт, вместимостью до 100 кг, напряжение 380 В. Проделан расчёт показателей качества электроэнергии для индукционной печи мощностью 70 кВт, 380 В. Проведен предварительный расчёт основных показателей качества электроэнергии: тока, коэффициента мощности, реактивной мощности, коэффициента несинусоидальности напряжения и тока, отклонения напряжения и частоты.

Для оценки реального влияния печи на электрическую сеть были проделаны измерения.

Параметры	Обозначение	Значение
Активная мощность	P	70 кВт
Линейное напряжение	U_L	380 В
Частота сети	f	50 Гц
Число фаз	m	3
Предполагаемый коэффициент мощности	cosφ	0,90
КПД установки (условно)	η	0,95

Для расчёта принимается, что 70 кВт — это активная электрическая мощность, потребляемая из сети. [1,10,6]

Расчёт основных электрических параметров

Полная мощность трёхфазной установки $S = \frac{P}{cos\varphi} = \frac{70}{0{,}90} = 77,78k$ВА

Реактивная мощность $Q = P \cdot tg\varphi = 70 \cdot 0,48 = 33,90\ k$ВА$p$

$$tg\varphi = 0,48$$

Если учитывать КПД установки 95 % и считать 70 кВт полезной выходной мощностью, ток при том же коэффициенте мощности составил приблизительно 124,3 А.

Линейный ток при этом для симметричной трёхфазной нагрузке

$$Il = \frac{P}{\sqrt{3U}cos\varphi} = \frac{70000}{1,732 \cdot 380 \cdot 0,90} = 118,1\text{А}$$

Отклонение напряжения определяется по формуле.

$$\delta U = \frac{U - U\text{ном}}{U\text{ном}} \cdot 100\% = \frac{365 - 380}{380} 100\% = 3,95\ \%$$

где Uном =380В – номинальное напряжение сети, U-изменённое напряжение на вводе печи при работе снизилось до 365 В.

Это означает снижение напряжения на 3,95 %. Само по себе такое значение ещё не позволяет установить соответствие всем требованиям качества: необходимо учитывать применяемый стандарт, точку измерения и продолжительность отклонения.

Несимметрия напряжений

Для трёхфазной сети желательно измерить напряжения U_{AB}, U_{BC} и U_{CA}.

Упрощённый показатель несимметрии линейных напряжений:

$$Ku = \frac{\Delta Umax}{Uср} \cdot 100\%$$

где $Uср = \frac{UAB + UBC + UCA}{3}$

ΔUmax- максимальное отклонение одного из измеренных напряжений от среднего. Пример: пусть измерены напряжения 380, 375 и 385 В.

$$Uср = \frac{380 + 375 + 385}{3} = 380В$$

Максимальное отклонение составляет 5 В, поэтому:

$$Ku = \frac{5}{380} \cdot 100\% = 1,32\%$$

Это упрощённая оценка по линейным напряжениям. Для нормативной оценки коэффициента несимметрии по обратной последовательности необходимы соответствующие измерения анализатором качества электроэнергии.

Коэффициент несинусоидальности напряжения

Индукционные печи с преобразователями частоты могут создавать высшие гармоники. Для оценки искажения напряжения используется коэффициент суммарных гармонических составляющих: [6,9,2]

$$THDu = \frac{\sqrt{\sum_h^H = 2U_h^2}}{U1} \cdot 100\%$$

где U1- действующее значение первой гармоники, Uh-действующее значение гармоники порядка h. Аналогично для тока:

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_h^H = 2I_h^2}}{I1} \cdot 100\% = \frac{23}{115} \cdot 100\% = 20\%$$

Эти показатели нельзя достоверно вычислить только по мощности 70 кВт и напряжению 380В. Нужен гармонический состав напряжении тока и измерений анализатором качества электроэнергии, например если гармоника тока равна 115 А, а суммарное действующее значение высших гармоник составляет 23 А:

Отклонение частоты определяется по формуле: $\delta f = \frac{f - f_{ном}}{f_{ном}} \cdot 100\%$

При измеренной частоте 49,8 Гц: $\delta f = \frac{49{,}8 - 50}{50} \cdot 100\% = -0{,}4\%$

При этом необходимо различать частоту питающей сети 50 Гц и рабочую частоту индуктора, которая может составлять сотни герц и рабочую частоту индуктора, которая может составлять сотни герц или несколько килогерц в зависимости от конструкции печи. [7,4]

Заключение

Учитывая выполненые расчёты были предложены меры по улучшению качества электрической энергии и повышению эффективности работы индукционных печей: [6,9]

1. Установка устройств компенсации реактивной мощности.
2. Снижение уровня высших гармоник.
3. Стабилизация напряжения питающей сети.
4. Контроль несимметрии фазных нагрузок.
5. Организация автоматизированного контроля качества электроэнергии.
6. Повышение эффективности эксплуатации индукционных печей.

Список литературы

1. А.Е. Слухоцкий, В.С. Немков, Н.А. Павлов, А.В.Бамунер.;Установки индукционного нагрева.учеб. пособие для вузов. – Л-Энергоиздат. – 1981. – 328 с.
2. Бейтуллаева Р.Х. Анализ управления режимами работы насосов насосной станции «Гувалак» // Universum: технические науки. – 2024. – Т. 6. – С. 67–70.
3. Бейтуллаева Р.Х. Комплексный энергоаудит жилых зданий с оценкой потенциала энергосбережения и внедрения ВИэ // Universum: технические науки. – 2026. – Т. 7. – С. 42–45.
4. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
5. Кулешов А.О. Разработка методики расчёта и оптимизация режимов работы индукционной тигельной печи с проводящим тиглем: дис. канд.техн. наук. – М., 2018.
6. Arrillaga J., Watson N.R. Power System Harmonics. 2nd ed. – Chichester: John Wiley & Sons, 2003. – 399 P.
7. IEC 61000-4-30:2025. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4–30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods. – IEC. – IEC, 2025.
8. IEC 61000-2-4:2024. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2–4: Environment – Compatibility levels in power distribution systems in industrial locations. – IEC. – IEC, 2024.
9. IEEE Std 519 IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems. – IEEE. – IEEE. – 2022.
10. Rudnev V., Loveless D., Cook R.L. Handbook of Induction Heating. 2nd ed. – Boca Raton: CRC Press, 2017. – 772 P.

References

1. A.E. Slukhotsky, V.S. Nemkov, N.A. Pavlov, A.V. Bamuner; [Induction Heating Installations. Textbook for Universities]. – L-Energoizdat.1981-328s (In Russ.).
2. Bejtullaeva R.Kh. [Analysis of control of operating modes of pumps at the Guvalak pumping station] // Universum: tekhnicheskie nauki. – 2024. – Vol. 6. (In Russ.).
3. Bejtullaeva R.Kh. [Comprehensive energy audit of residential buildings with assessment of energy-saving potential and implementation of renewable energy sources] // Universum: tekhnicheskie nauki. – 2026. – Vol. 7. (In Russ.).
4. GOST 32144 [Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems]. – 2013. (In Russ.).
5. Kuleshov A.O. [Development of a calculation methodology and optimization of operating modes of an induction crucible furnace with a conducting crucible: dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences]. – M., 2018 (In Russ.).
6. Arrillaga J., Watson N.R. Power System Harmonics. 2nd ed. – Chichester: John Wiley & Sons, 2003. – 399 P.
7. IEC 61000-4-30:2025. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4–30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods. – IEC. – IEC, 2025.
8. IEC 61000-2-4:2024. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2–4: Environment – Compatibility levels in power distribution systems in industrial locations. – IEC. – IEC, 2024.
9. IEEE Std 519 IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems. – IEEE. – IEEE. – 2022.
10. Rudnev V., Loveless D., Cook R.L. Handbook of Induction Heating. 2nd ed. – Boca Raton: CRC Press, 2017. – 772 P.

Статья поступила в редакцию: 10.11.2026
Статья принята к публикации: 16.11.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 004.4+519.8+621.31

DOI: 10.32743/UniTech.2026.152.11.23757

Архитектура и алгоритмическое обеспечение программного комплекса для стохастической оптимизации энергобаланса в системах PV–BESS с регуляризацией управления

Джайков Гафур Муратбаевич
преподаватель
Нукусский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Нукус

Баймуратова Гулайым Таджимурат кызы[2]
базовый докторант (PhD)
Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразми
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: gulayim0298@gmail.com

Architecture and algorithmic framework of a software suite for stochastic power balance optimization in PV–BESS systems with control regularization

Dzhaikov Gafur Muratbayevich
teacher
Nukus State Technical University
Republic of Uzbekistan, Nukus

Baimuratova Gulayim Tadzhimurat kyzy
PhD candidate (doctoral researcher)
Muhammad al-Khwarizmi Tashkent University of Information Technologies
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

В статье представлены математическая модель, численный алгоритм и модульный программный комплекс для оптимизации суточного баланса активной мощности в гибридных фотоэлектрических системах с аккумуляторными накопителями энергии (PV–BESS), работающих параллельно с внешней распределительной сетью. Для учета стохастической неопределенности солнечной генерации используется сценарный подход на основе метода аппроксимации выборочным средним (Sample Average Approximation, SAA), позволяющий формировать ансамбль равновероятных траекторий инсоляции. Чтобы предотвратить резкие скачки управляющих воздействий и снизить циклический износ

Библиографическое описание: Джайков Г.М., Баймуратова Г.Т.К. Архитектура и алгоритмическое обеспечение программного комплекса для стохастической оптимизации энергобаланса в системах PV–BESS с регуляризацией управления // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23757

аккумуляторной батареи, в целевую функцию введен квадратичный регуляризующий стабилизатор первого порядка по Тихонову, штрафующий межчасовые изменения мощности заряда и разряда. Программный комплекс, реализованный на языке Python с использованием решателей квадратичного программирования OSQP и CVXPY, протестирован на 24-часовом горизонте диспетчеризации для системы с фотоэлектрическими панелями номинальной мощностью 15 кВт и накопителем емкостью 40 кВт·ч при генерации 15 стохастических сценариев. По результатам вычислительного эксперимента суточные эксплуатационные затраты составили 27,77 $ для детерминированного варианта и 27,86 $ для сценарного варианта SAA; абсолютная разность равна 0,09 $ (около 0,32 % от детерминированных затрат). Полученные результаты подтверждают работоспособность разработанного алгоритмического обеспечения и наглядно иллюстрируют применение сценарного планирования и регуляризации управления в задачах диспетчеризации PV–BESS.

Abstract

The paper presents a mathematical model, a numerical algorithm, and a modular software suite for optimizing the daily active-power balance in grid-connected hybrid photovoltaic systems with battery energy storage (PV–BESS). To account for the stochastic uncertainty of solar generation, a scenario-based approach utilizing the Sample Average Approximation (SAA) method is applied, generating an ensemble of equiprobable insolation trajectories. To prevent abrupt jumps in control actions and mitigate cyclic degradation of the battery cells, a first-order quadratic Tikhonov regularization term is incorporated into the objective function to penalize inter-hour variations in charging and discharging power. The software package, implemented in Python using the OSQP and CVXPY quadratic programming solvers, is tested over a 24-hour scheduling horizon for a microgrid equipped with a 15 kW nominal PV array and a 40 kWh battery storage unit across 15 stochastic scenarios. According to the numerical results, the calculated daily operating costs are $27.77 for the deterministic baseline and $27.86 for the SAA stochastic model, yielding an absolute difference of $0.09 (approximately 0.32 % of the deterministic cost). These findings demonstrate the effectiveness of combining scenario-based stochastic planning with control regularization for operational PV–BESS energy management.

Ключевые слова: математическое моделирование, стохастическая оптимизация, метод SAA, регуляризация Тихонова, гибридные системы PV–BESS, баланс активной мощности, программный комплекс.

Keywords: mathematical modeling, stochastic optimization, Sample Average Approximation, Tikhonov regularization, PV–BESS systems, active power balance, software suite.

Введение

Математическое моделирование и разработка систем оперативного диспетчерского управления энергобалансом (Energy Management Systems - EMS) в распределенных микросетях с возобновляемыми источниками энергии представляют собой актуальную научно-техническую задачу [3, 1]. Базовой структурной единицей таких сетей выступают фотоэлектрические станции (ФЭС, PV), работающие совместно с электрохимическими накопителями энергии (BESS) [7]. Основная теоретическая и прикладная сложность

диспетчеризации подобных комплексов заключается в стохастической природе солнечной радиации: резкие флуктуации облачности и аэрозольного загрязнения атмосферы порождают глубокие кратковременные провалы мощности [10].

В инженерной практике широкое распространение получили программные комплексы на основе детерминированных методов линейного программирования (LP), такие как базовые модули HOMER Pro или PVsyst. Однако оптимизация по единственному усредненному прогнозу инсоляции формирует чрезмерно жесткие и уязвимые траектории: при фактическом спаде фотогенерации накопитель подвергается форсированному разряду, что ускоряет деградацию электрохимических ячеек [2]. Применение методов стохастической оптимизации, в частности метода аппроксимации выборочным средним (Sample Average Approximation – SAA), позволяет учесть вероятностное распределение возмущений через генерацию ансамбля сценариев [8, 4].

Вместе с тем применение сценарных методов требует корректного учета неопределенности и согласованного описания управляющих переменных для различных сценариев. В рассматриваемой постановке базовая функция эксплуатационных затрат является линейной, поэтому ее собственный Гессиан равен нулю. Добавление квадратичного регуляризующего слагаемого по разностям мощности заряда и разряда делает целевую функцию чувствительной к межчасовым изменениям управления и позволяет штрафовать резкие колебания мощности аккумулятора. При этом такая регуляризация сама по себе не гарантирует положительную определенность матрицы Гессе: для оператора первых разностей соответствующая матрица обычно является положительно полуопределенной [6]. Целью настоящей работы является разработка математической модели, алгоритмического обеспечения и программного комплекса для сценарной оптимизации суточного баланса мощности в системах PV–BESS с регуляризацией управления по Тихонову.

Материалы и методы

Рассматривается локальный энергоузел, функционирующий параллельно с внешней электрической сетью и содержащий фотоэлектрический массив номинальной мощностью 15 кВт и аккумуляторный блок номинальной емкостью 40 кВт·ч. Диспетчеризация выполняется на суточном горизонте, состоящем из 24 часовых интервалов, при шаге дискретизации $\Delta t = 1$ч. Множество временных индексов обозначим через $T = \{1, 2, \dots, 24\}$, а множество сценариев - через $\Omega = \{1, 2, \dots, S\}$, где $S = 15$. Для учета неопределенности солнечной генерации формируется ансамбль равновероятных сценариев с вероятностями $\pi_s = 1/S$.

Управляющий вектор системы на каждом шаге t и для каждого сценария s объединяет мощность потребления из внешней сети $P_{grid}^{t,s}$, а также мощности заряда $P_{ch}^{t,s}$ и разряда $P_{dis}^{t,s}$ аккумуляторной батареи:

$$u_{t,s} = [P_{grid}^{t,s}, P_{ch}^{t,s}, P_{dis}^{t,s}]^T \in R_+^3 \quad (1)$$

Физическая реализуемость энергоснабжения требует строгого выполнения баланса активной мощности на шинах нагрузки для каждого расчетного часа и сценария:

$$P_{grid}^{t,s} + \widetilde{P}_{PV}^{t,s} + P_{dis}^{t,s} - P_{ch}^{t,s} = P_{load}^{t}, \ \forall t \in \mathcal{T}, \forall s \in \Omega, \quad (2)$$

где P_{load}^{t} - суточный график активной мощности нагрузки; $\widetilde{P}_{PV}^{t,s}$ - полезная стохастическая мощность фотогенерации в сценарии s, определяемая с учетом коэффициента полезного действия PV -тракта η_{PV}. Динамика энергосодержания аккумулятора описывается дискретным рекуррентным уравнением состояния заряда (State of Charge - SOC):

$$SOC_{t,s} = SOC_{t-1,s} + \frac{\eta_{ch}\Delta t}{E_{nom}} P_{ch}^{t,s} - \frac{\Delta t}{\eta_{dis} E_{nom}} P_{dis}^{t,s} \quad (3)$$

где η_{ch}, η_{dis} - коэффициенты полезного действия процессов заряда и разряда. Вектор состояния подчинен технологическим ограничениям, предотвращающим глубокий циклический износ, а также граничным условиям замкнутости суточного цикла:

$$SOCt, s0_{init\,24\,t\,\arg\,et\,\max\,\min} \quad (4)$$

Технологические диапазоны пропускной способности электрооборудования задаются соотношениями:

$$0 \le P_{ch}^{t,s} \le P_{ch}^{max_{dis\,dis}^{t,s}\ max_{grid\,grid}^{t,s}\ \max} \quad (5)$$

Экономический критерий задачи ориентирован на минимизацию суммарных суточных эксплуатационных расходов, включающих затраты на покупку электроэнергии из внешней сети по тарифу c_{grid}^{t} и удельную стоимость циклической деградации аккумулятора $c_{\deg}$:

$$J_{\cos t}(U) = \sum_{s=1}^{S\sum} \pi_s \sum_{t=1}^{T\sum} [c_{grid}^{t} P_{grid}^{t,s} + c_{ch\,dis\,\deg}^{t,s\,t,s} \quad (6)$$

Ввиду линейности выражения (6) прямое решение задачи приводит к скачкам управления по вершинам допустимого многогранника при малейших возмущениях прогноза инсоляции. Для преодоления численной некорректности и обеспечения гладкости диспетчерского графика в целевую функцию вводится квадратичный регуляризирующий стабилизатор Тихонова первого порядка, штрафующий резкие межшаговые градиенты мощности батареи:

$$J_{\alpha}(U) = J_{\cos t}(U) + \frac{\alpha}{2} \sum_{s=1}^{S} \pi_s \sum_{t=1}^{T-1} \left[(P_{ch}^{t+1,s} - P_{ch}^{t,s})^2 + (P_{dis}^{t+1,s} - P_{dis}^{t,s})^2 \right] \to \min_{U \in D} \quad (7)$$

где α > 0 - параметр регуляризации; D - допустимое множество, задаваемое линейными ограничениями (2)-(5). Квадратичное слагаемое штрафует резкие межчасовые изменения мощности заряда и разряда. Однако матрица $D^{T}D$ для оператора первых разностей является, вообще говоря, положительно полуопределенной, а не строго положительно определенной. Поэтому единственность решения и строгую выпуклость всей задачи нельзя обосновывать только наличием данного регуляризующего слагаемого; эти свойства зависят также от остальных членов целевой функции и ограничений конкретной постановки.

Численная реализация математической модели выполнена в виде специализированного программного комплекса, разработанного на языке Python с графическим пользовательским интерфейсом на платформе Tkinter/Matplotlib. Архитектура программного комплекса объединяет модуль параметрической конфигурации с предварительной проверкой допустимости физических диапазонов, генератор стохастических сценариев на основе нормального распределения возмущений с заданным параметром σ, вычислительное ядро, использующее разреженные матричные структуры и решатели задач квадратичного программирования OSQP/CVXPY, а также подсистему визуализации и экспорта результатов в табличные форматы XLSX и CSV.

Результаты и обсуждение

Апробация разработанного программного комплекса выполнена на суточном интервале диспетчеризации для микросети со следующими физическими и экономическими параметрами, заданными в конфигурационном интерфейсе (табл. 1).

Таблица 1. Параметры гибридной системы PV–BESS в программном комплексе

Параметр системы	Обозначение	Значение	Единица измерения
Номинальная мощность массива фотопанелей	P_{PV}^{nom}	15,0	кВт
Коэффициент полезного действия PV-тракта	η_{PV}	0,88	о.е.
Номинальная емкость накопителя BESS	E_{nom}	40,0	кВт·ч
Предельная мощность заряда и разряда	$P_{ch}^{max_{dis}^{\max}}$	10,0	кВт
Начальный уровень заряда BESS	SOC_{init}	0,40 (40 %)	о.е.
Минимальный порог разряда аккумулятора	$SOC_{\min}$	0,20 (20 %)	о.е.
Максимальный порог заряда аккумулятора	$SOC_{\max}$	0,90 (90 %)	о.е.
Удельная стоимость деградации BESS	$c_{\deg}$	0,04	$/кВт·ч
Количество стохастических сценариев	S	15	ед.
Коэффициент дисперсии инсоляции	σ	0,20	о.е.
Предел мощности сетевого подключения	$P_{grid}^{\max}$	35,0	кВт

На предварительном этапе оптимизации генератор стохастических сценариев формирует ансамбль траекторий инсоляции, отражающих климатическую нестационарность солнечного дня (рис. 1).

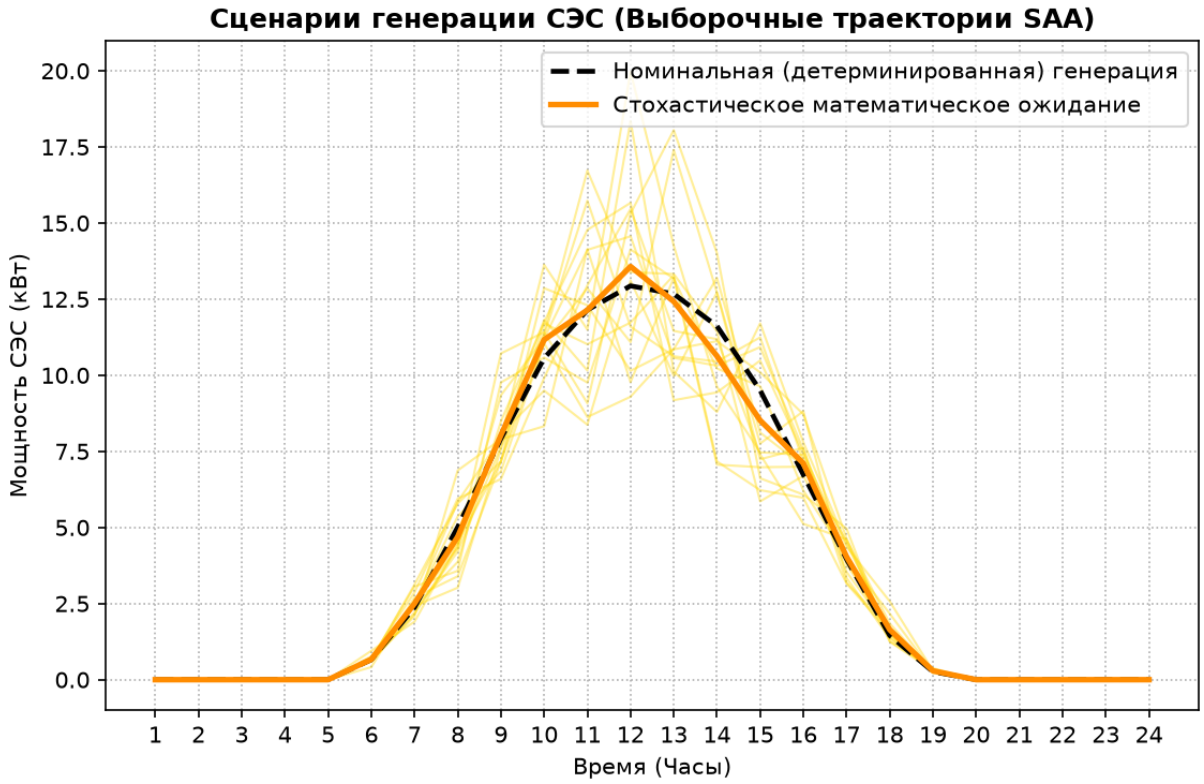


Рисунок 1. Ансамбль стохастических сценариев генерации ФЭС (S = 15, σ = 0,20): пунктир – номинальная детерминированная кривая; сплошная линия – стохастическое математическое ожидание; тонкие линии – реализации сценариев

Графический анализ сценариев показывает, что в период с 10:00 до 15:00 мощность генерации ФЭС в отдельных сценариях изменяется в диапазоне от 9,0 до 20,5 кВт при детерминированном полуденном максимуме 12,8 кВт. Математическое ожидание стохастической мощности в точке зенита составляет 13,57 кВт. Значение 20,5 кВт превышает указанную в табл. 1 номинальную мощность PV-массива 15 кВт; поэтому перед публикацией необходимо проверить, учитывает ли сценарный генератор масштабирование мощности или использует иную трактовку номинального параметра.

По завершении оптимизационного цикла программный комплекс выводит графические зависимости суточного баланса мощности и результирующее диалоговое окно сопоставления экономических затрат (рис. 2), а также детальные профили динамики состояния заряда и токов накопителя (рис. 3).

Рисунок 2. Графическое окно суточного распределения оптимальных потоков мощности по модели SAA и окно сравнительной экономической оценки

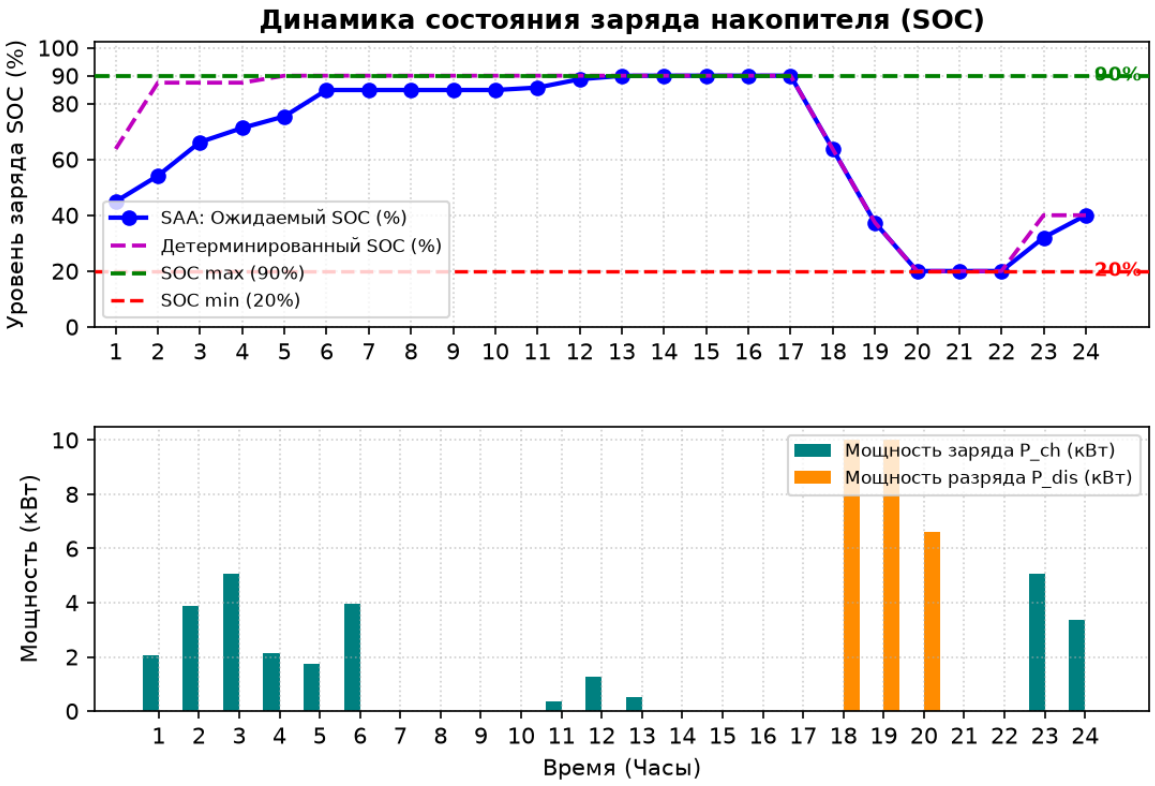


Рисунок 3. Динамика работы накопителя энергии BESS: вверху – траектории уровня заряда для стохастической (сплошная линия) и детерминированной (пунктир) моделей; внизу -почасовое распределение мощности заряда и разряда

Почасовые численные значения энергетических потоков, экспортированные из расчетной таблицы комплекса для характерных временных интервалов, сведены в табл. 2.

Таблица 2. Выборочная ведомость численных результатов почасовой диспетчеризации

Час t	**P_{load}, кВт**	**PV стох., кВт**	**Сеть SAA, P_{grid} кВт**	**P_{ch}, кВт**	**P_{dis}, кВт**	**SOC SAA, %**	**SOC дет., %**
1	5,20	0,00	7,27	2,07	0,00	44,9	63,7
2	4,80	0,00	8,69	3,89	0,00	54,2	87,5
3	4,50	0,00	9,58	5,08	0,00	66,2	87,5
4	4,50	0,00	6,63	2,13	0,00	71,3	87,5
5	5,00	0,00	6,75	1,75	0,00	75,4	90,0
6	6,20	0,67	9,51	3,98	0,00	84,9	90,0
10	15,00	11,17	3,83	0,00	0,00	84,9	90,0
12	13,50	13,57	1,19	1,26	0,00	88,7	90,0
13	14,00	12,42	2,09	0,51	0,00	90,0	90,0
18	19,50	1,64	7,86	0,00	10,00	63,7	63,7
19	21,00	0,29	10,71	0,00	10,00	37,4	37,4
20	18,50	0,00	11,90	0,00	6,60	20,0	20,0
21	15,00	0,00	15,00	0,00	0,00	20,0	20,0
23	8,00	0,00	13,05	5,05	0,00	32,0	40,0
24	6,00	0,00	9,37	3,37	0,00	40,0	40,0

Совместный анализ расчетных графиков и таблицы позволяет детально проследить поведение оптимизатора. В интервале ночного тарифного минимума (с 01:00 по 06:00) детерминированная модель агрессивно форсирует заряд аккумулятора до предельной планки $SOC_{\max}$ = 90,0 % уже к 5-му часу. Стохастический алгоритм SAA производит заряд существенно мягче (доводя уровень SOC лишь до 84,9 % к 6-му часу), осознанно резервируя свободную буферную емкость для поглощения вероятных полуденных пиков генерации ФЭС. В результате в дневные часы (12:00–13:00) избыточная солнечная мощность плавно дозаряжает накопитель до предельных 90,0 % без необходимости принудительного ограничения генерации панели.

В период вечернего пика энергопотребления (18:00 – 20:00), когда генерация ФЭС практически спадает до нуля, а нагрузка достигает максимума в 21,0 кВт, комплекс активирует разряд BESS на полную паспортную мощность 10,0 кВт на 18-м и 19-м часах и 6,60 кВт на 20-м часе. Это позволяет срезать пик потребления из внешней сети до безопасного уровня 10,71–11,90 кВт. При этом глубина разряда аккумулятора достигает минимально допустимого технологического порога $SOC_{\min}$ = 20,0 %, не нарушая его. К окончанию расчетных суток (23:00 – 24:00) алгоритм вновь активирует ночной подзаряд батареи (P_{ch}^{23} = 5,05 кВт, P_{ch}^{24} = 3,37 кВт), обеспечивая возврат энергосодержания к заданному исходному уровню SOC_{24} = 40,0 % для старта следующего цикла.

Сравнительный экономический расчет фиксирует суточные затраты на уровне 27,77 $ для детерминированного плана и 27,86 $ для сценарной модели SAA. Абсолютная разность между рассчитанными значениями составляет 0,09 $, а относительная разность по отношению к детерминированным затратам равна (27,86 − 27,77) / 27,77 × 100 % ≈ 0,32 %.

$$\Delta J = J_{\text{SAA}} - J_{\text{det}} = 27,86 - 27,77 = 0,09\$ \quad (8)$$

Полученная разность характеризует отличие затрат в двух рассмотренных расчетных вариантах. Ее нельзя автоматически отождествлять с ценностью стохастического решения (Value of the Stochastic Solution, VSS): для вычисления VSS необходимо дополнительно оценить детерминированное решение на сценарной модели и сопоставить соответствующие ожидаемые затраты. Следовательно, в настоящем расчете значение 0,09 $ следует интерпретировать как разность между приведенными суточными затратами двух вариантов, а не как доказанную стоимость риска неопределенности. Влияние регуляризации на сглаживание профиля управления должно оцениваться по рассчитанным временным рядам мощности заряда и разряда.

Заключение

Разработан программный комплекс для сценарной оптимизации суточного баланса мощности в гибридных энергосистемах PV–BESS с учетом неопределенности солнечной генерации. В математической постановке использованы баланс активной мощности, ограничения на мощность заряда и разряда, а также динамика состояния заряда аккумулятора. Для учета сценарной неопределенности применен метод аппроксимации выборочным средним (SAA), а для штрафования резких межчасовых изменений управления — квадратичный регуляризующий член первого порядка по Тихонову. В рассмотренном вычислительном примере при 15 сценариях суточные затраты составили 27,77 $ для детерминированного варианта и 27,86 $ для варианта SAA; разность равна 0,09 $ (около 0,32 %). Расчетные значения SOC находятся в заданном диапазоне 20–90 % и к концу суток возвращаются к уровню 40 %. Полученные результаты относятся к рассмотренной конфигурации и не являются универсальной гарантией устойчивости для любых режимов PV–BESS. Перед практическим внедрением требуется дополнительная проверка сценарного генератора, параметров аккумулятора и вычислительных результатов на расширенном наборе исходных данных.

Список литературы

1. Васильев Ф.П. Численные методы решения экстремальных задач. 112–148 с. – М.: Наука, 1988.
2. Дргоня Я., Арройо Х. Купейро Фигероа И. и др. All you need to know about model predictive control for buildings // Annual Reviews in Control. – 2020. – Т. 50. – P. 190–232. – DOI: 10.1016/j.arcontrol.2020.09.001.
3. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. 54. – М.: Наука, 1986. – 89 с.
4. Bertsimas D., Litvinov E., Sun X.A., Zhao J., Zheng T. Adaptive robust optimization for the security constrained unit commitment problem // IEEE Transactions on Power Systems. – 2013. – Т. 28, № 1. – P. 52–63. – DOI: 10.1109/TPWRS.2012.2205021.
5. Boyd S., Vandenberghe L. Convex Optimization. 127. – Cambridge: Cambridge University Press, 2004. – 188 P. – DOI: 10.1017/CBO9780511804441.

6. Engl H.W., Hanke M., Neubauer A. Regularization of Inverse Problems. 31–68 с. – Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996. – DOI: 10.1007/978-94-009-1740-8.
7. Khatib T., Ibrahim I.A., Mohamed A. A review on sizing methodologies of photovoltaic array and storage battery in a standalone photovoltaic system // Energy Conversion and Management. – 2016. – Т. 120. – P. 430–448. – DOI: 10.1016/j.enconman.2016.05.011.
8. Shapiro A., Dentcheva D., Ruszczynski A. Lectures on Stochastic Programming: Modeling and Theory. 155–214 с. – Philadelphia: SIAM, 2009. – DOI: 10.1137/1.9780898718751.
9. Stellato B., Banjac G., Goulart P., Bemporad A., Boyd S. OSQP: an operator splitting solver for quadratic programs // Mathematical Programming Computation. – 2020. – Т. 12. – P. 637–672. – DOI: 10.1007/s12532-020-00179-2.
10. Zia M.F., Elbouchikhi E., Benbouzid M. Microgrids energy management systems: A critical review on methods, solutions, and prospects // Applied Energy. – 2018. – Т. 222. – P. 1033–1057. – DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.04.103.

References

1. Vasil'ev F.P. (1988) Chislennye metody resheniya ekstremal'nykh zadach [Numerical Methods for Solving Extremal Problems]. Moscow: Nauka Publ. [In Russ.] P.112–148.
2. Drgoňa, J., Arroyo, J., Cupeiro Figueroa, I., et al. (2020) 'All you need to know about model predictive control for buildings', Annual Reviews in Control, 50, P. 190–232. DOI: 10.1016/j.arcontrol.2020.09.001.
3. Tikhonov A.N. and Arsenin V.Ya. (1986) Metody resheniya nekorrektnykh zadach [Methods for Solving Ill-Posed Problems]. Moscow: Nauka Publ. [In Russ.] P. 54–89.
4. Bertsimas, D., Litvinov, E., Sun X.A., Zhao, J. and Zheng, T. (2013) 'Adaptive robust optimization for the security constrained unit commitment problem', IEEE Transactions on Power Systems, 28(1), P. 52–63. DOI: 10.1109/TPWRS.2012.2205021.
5. Boyd, S. and Vandenberghe, L. (2004) Convex Optimization. Cambridge: Cambridge University Press. P. 127–188. DOI: 10.1017/CBO9780511804441.
6. Engl H.W., Hanke, M. and Neubauer, A. (1996) Regularization of Inverse Problems. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. P. 31–68. DOI: 10.1007/978-94-009-1740-8.
7. Khatib, T., Ibrahim I.A. and Mohamed, A. (2016) “A review on sizing methodologies of photovoltaic array and storage battery in a standalone photovoltaic system”: Energy Conversion and Management. – 2016. – T. 120. – P. 430–448. – DOI: 10.1016/j.enconman.2016.05.011.
8. Shapiro, A., Dentcheva, D. and Ruszczynski, A. (2009) Lectures on Stochastic Programming: Modeling and Theory. Philadelphia: SIAM. P.155–214. DOI: 10.1137/1.9780898718751.
9. Stellato, B., Banjac, G., Goulart, P., Bemporad, A. and Boyd, S. (2020) “OSQP: an operator splitting solver for quadratic programs”: Mathematical Programming Computation, 12, P. 637–672. DOI: 10.1007/s12532-020-00179-2.
10. Zia M.F., Elbouchikhi, E. and Benbouzid, M. (2018) “Microgrids energy management systems: A critical review on methods, solutions, and prospects”, Applied Energy, 222, P. 1033–1057. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.04.103.

Статья поступила в редакцию: 14.10.2026
Статья принята к публикации: 31.10.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 621.791+666.3+519.6

Разработка классификационной схемы компонентов керамических флюсов и математической модели формирования химического состава металла шва при автоматической дуговой сварке

Эрматов Зиядулла Досматович
проф.
д-р. техн. наук, Ташкентский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: dziyodulla@gmail.com

Гальперин Леонид Владимирович
PhD, доц.
зам. директора СП ООО «PO'LAT-QUVURSERVIS»
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: galperin74@mail.ru

Рахматуллаева Нозима Тоир кизи
старший преподаватель
Ташкентский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: n.raxmatullayeva@mail.ru

Development of a classification scheme for the components of ceramic fluxes and a mathematical model for the formation of the chemical composition of the weld metal in automatic arc welding

Ermatov Ziyadulla Dosmatovich
professor
DSc Tashkent State Technical University
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Galperin Leonid Vladimirovich
PhD, Associate Professor
Deputy Director of PO'LAT-QUVURSERVIS LLC JV
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Rakhmatullaeva Nozima Toir kizi
senior Lecturer
Tashkent State Technical University
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Библиографическое описание: Эрматов З.Д., Гальперин Л.В., Рахматуллаева Н.Т. кизи Разработка классификационной схемы компонентов керамических флюсов и математической модели формирования химического состава металла шва при автоматической дуговой сварке // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23677

Аннотация

В статье рассмотрены вопросы совершенствования составов керамических сварочных флюсов для автоматизированной дуговой сварки на основе анализа свойств минерального сырья и разработки математической модели формирования металла шва. Актуальность исследования обусловлена высокой зависимостью рынка Узбекистана от импортных сварочных флюсов, отличающихся высокой стоимостью и нестабильным качеством, что определяет необходимость создания эффективных отечественных материалов. В работе проведён комплексный анализ термических характеристик сырьевых компонентов, включая температуры стеклования, плавления, протекания физико-химических процессов, затвердевания и коэффициентов температурного расширения. Предложена классификация компонентов керамических флюсов по их функциональному назначению, включающая стабилизаторы, модификаторы, газообразующие и шлакообразующие компоненты. На основе классификационной схемы разработана математическая модель, описывающая процессы легирования и формирования структуры металла шва на различных стадиях сварки. Создан модернизированный состав агломерированного флюса, обеспечивающий улучшение пластических и ударных свойств сварного соединения за счёт измельчения структуры металла и повышения степени его рафинирования по сере и фосфору. Сравнение расчётных данных модели с экспериментальными результатами показало их высокую сходимость: максимальное расхождение не превышает 5 %. Полученные результаты подтверждают возможность практического применения разработанного состава и модели при проектировании новых сварочных материалов и совершенствовании технологий автоматизированной сварки.

Abstract

The article examines the improvement of ceramic welding flux compositions for automated submerged arc welding based on the analysis of mineral raw materials and the development of a mathematical model describing weld metal formation. The relevance of the study is determined by the significant dependence of the Uzbek welding materials market on imported fluxes characterized by high cost and unstable quality, which necessitates the development of efficient domestic alternatives. A comprehensive thermal analysis of the raw materials was carried out, including the determination of glass transition, melting, solidification temperatures, physicochemical transformation intervals, and thermal expansion coefficients. A functional classification of ceramic flux components is proposed, dividing them into stabilizers, alloying modifiers, gas-forming agents, and slag-forming materials. Based on this classification, a mathematical model describing alloying processes and weld metal structure formation at different welding stages was developed. An improved agglomerated flux composition was designed, providing enhanced impact toughness and plasticity of the weld metal through grain refinement and more effective purification from sulfur and phosphorus impurities. A comparison between the calculated model predictions and experimental results demonstrated good agreement, with deviations not exceeding 5 %. The obtained findings confirm the reliability of the proposed model and the practical applicability of the developed flux composition for designing advanced welding materials and improving the efficiency and quality of automated welding technologies.

Ключевые слова: автоматическая дуговая сварка, плавленый флюс, минерально-сырьевые ресурсы, ферросплавы, минеральное сырье, коэффициент перехода элемента.

Keywords: automatic arc welding, fused flux, mineral resources, ferroalloys, mineral raw materials, elemental transfer coefficient.

Введение

Сварочное производство можно считать ключевым в сфере промышленности в разных странах мира. Именно оно обеспечивает свыше 50 % ВВП государств с развитой промышленностью. [6,2]. На внутреннем рынке сварочных материалов Узбекистана преобладает стабильность функционирования и развития. Одна н сегодняшний день на нем присутствует высокий объем флюсов для сварки иностранного производства. Это влечет за собой высокую стоимость и нестабильное (зачастую низкое) качество продукции. [3,1]

Используемые сегодня флюсы, по сути, представляют собой системы, включающие множество компонентов. Многокомпонентные составы максимизируют их необходимые свойства. Это позволяет применять готовую продукцию для решения широкого спектра задач технологического и металлургического характера. Типовые компоненты рассматриваемой продукции характеризуются высокой степенью разнородности шихтовых частиц. Это относится к размерам фракции, морфологическим свойствам, вязкости и плавкости при обработке. Разница в свойствах на всех уровнях нередко влечет за собой сложности. Последние связаны прежде всего с тем, чтобы обеспечить необходимые характеристики на выходе – для готовой продукции. Речь идет, например о стабильном горении дуги. Газовая и шлаковая функции также должны иметь заранее определенные показатели. Причем последние существенно различаются в зависимости от того о какой продукции идет речь. [5,4]

Материалы и методы исследования

Базовые характеристики сырья проанализированы методом термического анализа – был выполнен анализ температур таковых на разных стадиях. Исследованы наиболее значимые свойства сырьевых составляющих: температура стеклования (T_g), плавления ($T_{пл}$), течения химических и физических реакций при обработке, интервала затвердевания. В работе проанализирован процесс расплава с учетом заданных темпов охлаждения. Данный шаг позволил в том числе установить коэффициенты (K) температурного расширения. Оценка показателей формирования сварного шва и отделимости шлаковой корки производилась посредством изучения технической документации.

Результаты и обсуждение

Производство керамических сварочных флюсов происходит на основе применения специальной базы сырья (минерально-сырьевая). Ее можно условно разделить на такие категории как: сплавы железа, синтетические химические материалы, минеральное сырье.

При изучении шихтовых компонентов для производства рассматриваемого типа была использована специальная классификация. Для наглядности она отражена на рисунке 1 далее в статье. Готовые флюсы применяются для автоматизированной сварки.

Минералы и сырье в этом контесте можно поделить на группы. При этом основным критерием является то, для чего именно используются составляющие материалов. Исходя из этого они категоризированы на: стабилизаторы, модификаторы (для легирования), газообразователи и шлакообразующие агенты.

Что касается критериев необходимых для оптимального минерального сырья, шихта огранивается таким показателем как содержание фосфора (P) и серы (S). Если последние являются примесями, то железо (Fe) – ключевой элемент, который также учитывается. [7,8]

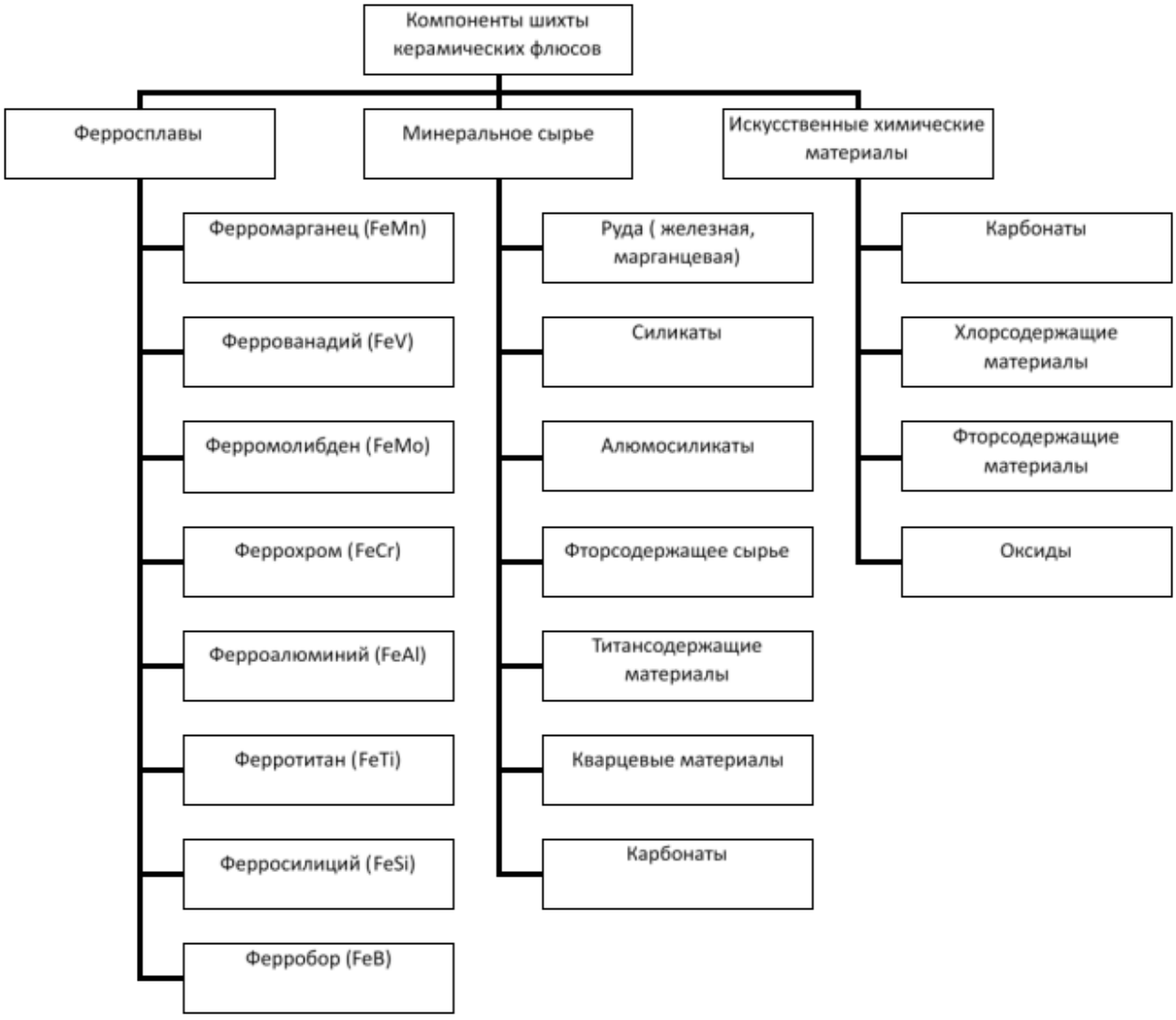


Рисунок 1. Классификация компонентов, входящих в состав керамических сварочных флюсов

Хотя в настоящее время уже достигнуты немалые результаты в сфере разработки и производства рассматриваемой продукции, в этой области до сих пор присутствует широкий спектр задач, требующих решения. В частности, требуется углубленное изучение моделей и методов применяемых для создания прогнозов относительно будущего состава шва при выполнении сварки рассматриваемым способом.

В данной статье представлены материалы по итогам исследования. Оно было выполнено для того, чтобы максимально быстро и точно (с учетом возможного масштабирования) решить актуальные задачи промышленного производства. Это,

в частности, позволило оценить процессы, протекающие на разных стадиях. Так представляется возможным объективно оценить и итоги непосредственно сварки. Речь идет о фазах:

- твердая;
- капля;
- жидкая.

Оценка такого рода позволяет установить точные значения, при которых компоненты реализуют переход. Так устанавливаются частные и средние *K*.

Разработка базируется на классификации материалов покрытия электродов. За счет нее была смоделирована рабочая матрица.

1. Средний *K* легирования $\overline{\eta}_{E_z}$. Обозначен как % (доля) массы элемента E_z, сохраняемая в присадке:

$$\overline{\eta}_{E_z} = \frac{m_{E_z}^{\text{напл}}}{m_{E_z}^{\text{смеш}}} \quad (1)$$

$m_{E_z}^{\text{напл}}$ - % E_z в металле по итогу реакции (в кг);

$m_{E_z}^{\text{смеш}}$ - % E_z в металле без учета реакций.

2. Средний *K* легирования E_z:

$$\overline{\eta}_{E_я} = a\eta_{E_z}^{\text{стер}} + b\eta_{E_z}^{\text{ч.м.}} + c\eta_{E_z}^{\text{фер}} + d\eta_{E_z}^{\text{шл.мин}} + e\eta_{E_z}^{\text{щл.иск.вещ}} \quad (2)$$

$$a + b + c + d + e = 1 \quad (3)$$

Здесь: a, b, c, d и e – показатели долевого участия компонентов в формировании присадки. Это: проволока, синтетические химические компоненты, сплавы на базе Fe, минералы и восстановленный металл.

$$\eta_{E_z}^{\text{св. пр}} = 1 - k_1^{E_z}, \quad (4)$$

$$\eta_{E_z}^{\text{ч.м.}} = 1 - k_2^{E_z}, \quad (5)$$

$$\eta_{E_z}^{\text{фер}} = 1 - k_3^{E_z}, \quad (6)$$

$$\eta_{E_z}^{\text{шл.мин.}} = k_4^{E_z}, \quad (7)$$

$$\eta_{E_z}^{\text{шл.иск.вещ}} = k_5^{E_z}, \quad (8)$$

$\eta_{E_z}^{\text{св.пр}}$,$\eta_{E_z}^{\text{фер}}$, $\eta_{E_z}^{\text{шл.мин.}}$ и $\eta_{E_z}^{\text{шл.иск.вещ}}$ - частные *K* легирования E_z в присадку из проволоки, шлака и сплавов. Шлаки являются побочным продуктом реакций минералов и синтетических составляющих.

Где:$k_1^{E_z}$ - трактуется как % E_z проволоки. Последняя подвергается окислению за счет влияния на нее шлаков и газов.

$k_2^{E_z}$ - % E_z металлической составляющей. Она также, окисляется за счет влияния факторов, указанных выше.

$k_3^{E_z}$- описывает % оксида E_z неметаллической составляющей (мин. сырье). $k_3^{E_z}$ легируется в результате течения восстановительных процессов на этапе 2 (капля).

$k_4^{E_z}$- характеризует аналогичный предыдущему показатель для синтетических химикатов. Легирование здесь производится таким же образом.

3. Масса элемента в присадке:

$$m_{E_z}^{\text{напл}} = m^{\text{св.пр.}} \cdot \frac{E_z^{\text{св. пр}}}{100} + \sum_{k=1}^{l} m_k^{\text{фер}} \cdot \frac{E_z^{\text{фер}}}{100} + \sum_{k=1}^{p} m_k^{\rightleftarrows \text{шл.мин}} \cdot \frac{E_z^{\text{шл.мин}}}{100} +$$

$$+ \sum_{k=1}^{s} m_k^{\rightleftarrows \text{шл.иск.вещ.}} \cdot \frac{E_z^{\text{шл.иск.вещ.}}}{100} = m_{E_z}^{\text{св. пр.}} + m_{E_z}^{\text{фер}} + m_{E_z}^{\text{шл.мин.}} + m_{E_z}^{\text{шл.иск.вещ.}}, \quad (9)$$

$m_{E_z}^{\text{св.пр.}}$, $m_{E_z}^{\text{фер}}$, $m_{E_z}^{\text{шл}}$ масса E_z в проволоке, Fe-сплавах, масса, восстановленная из прочих компонентов без включения Fe.

4. *K* легирования E_z.:

$$\bar{\eta}_{E_z} = \frac{[E_z]_{\text{н.м.}}}{a[E_z]_{\text{св.пр.}} + b[E_z]_{\text{фер.}} + \text{c}[E_z]_{\text{шл.мин.}} + d[E_z]_{\text{шл.иск.вещ.}}} \quad (10)$$

$[E_z]_{\text{н.м.}}$- исходный % E_z в присадке по итогам химического анализа;

$[E_z]_{\text{стер}}$- % на входе E_z в проволоке;

$[E_z]_{\text{фер}}$- первоначальный % E_z Fe-сплава, интегрированного в состав флюса;

$[E_z]_{\text{шл.мин}}$- базовый % E_z при 100 % восстановлении оксида $E_{zn}O_m$ из минералов шлака;

$[E_z]_{\text{иск.вещ.}}$- изначальный % E_z в химически чистых веществах, интегрированных в состав;

5. Масса компонента в расплаве:

$$m_{E_z} = \frac{m_{\text{св.ванны}} \cdot [E_z]_{\text{распл}}}{100} \quad (11)$$

$m_{\text{св.ванны}}$– масса расплава (в кг); $[E_z]_{\text{распл}}$– содержание E_z в нем же (в % от массы).

В ходе работы создан модернизированный состав агломерированного флюса. Он отличается от традиционных аналогов более совершенными показателями относительно ударных и пластических качеств шовного металла на выходе. Это очень важно для повышения качества и конкурентоспособности готовой продукции. Новый состав (в %): мрамор – 16,0–19,0, кварцевый песок (SiO_2) – 42,6–44,8, плавиковый шпат (CaF_2) – 10,3–12,4, каолин обогащенный – 9,8–11,4, ферросиликомарганец (FeMnSi)– 20,9–21,1.

Необходимый эффект обеспечен за счет того, что состав разработки обеспечивает значительное изменение структуры продукта на уровне компонентов. В итоге она становится более мелкой. Также таким образом формируются новые локации кристаллизации и шовного рафинирования по примесям. Последние обозначены в начале статьи. Таким образом разработка может использоваться в промышленных масштабах.

Заключение

Созданная и описанная в статье классификационная схема шихтовых компонентов керамических флюсов, используемых при автоматизированной дуговой сварке, реализует возможность первичного анализа компонентов шихты. Сравнительные расчетные показатели математической модели, которая отражает процесс формирования структуры шовного металла при сварке указанного типа, полностью соответствуют экспериментальным данным. Максимальные расхождения между ними составляют до 5 %, что допустимо. Показатели модели получены на основе классификационной схемы составных компонентов керамических флюсов.

Разработанный состав обеспечивает оптимальные характеристики металла шва в контексте пластичности и ударных свойств. Данная цель достигнута благодаря рафинированию шва по сере и фосфору. Способствует ее достижению и измельчение его структуры через создание дополнительных центров кристаллизации.

Список литературы

1. Кузнецов М.А. Нанотехнологии и наноматериалы в сварочном производстве (Обзор) / М.А. Кузнецов, Е.А. Зернин // Сварочное производство. – 2010. – № 12. – С. 23–26.
2. Моравецкий С.И. Отделимость шлаковой корки при дуговой сварке (обзор)Ч. 1. Механизм химического сцепления шлаковой корки с металлом шва // Автоматическая сварка. – 2011. – № 1. – С. 32–37.
3. Моравецкий С.И. Отделимость шлаковой корки при дуговой сварке (Обзор). Ч. 2. Характер влияния основных факторов на отделимость шлаковой корки // Автоматическая сварка. – 2011. – № 2. – С. 22–27.
4. Подгаецкий В.В., Кузьменко В.Г. Сварочные шлаки. Справочное пособие. –Киев. – 1988. – 253 с.
5. С.В. Наумов, А.Е. Канина, А.М. Игнатова, М.Н. Игнатов. О фракционном составе сварочных флюсов // Научно-технический вестник Поволжья. – 2013. – № 2. – С. 166–169.
6. Ю.В. Адкина, А.И. Николаев, В.Б. Петров, Н.М. Путинцев. Легирующие элементы в минеральных и синтетических компонентах сварочных материалов // Журн. прикл. химии. – 1964. – Т. 83, № 12. – С. 1960–1964.
7. Khudoyorov S.S., Galperin L. V, Dunyashin N.S., Ermatov Z.D., Rahmatullayeva N.T., Abdullaev M.Z. Investigation of the interaction of metal with complex gases in the development of the composition of ceramic fluxes for automatic arc welding of low-carbon and low-alloy steels // International Journal Of Advanced Research in Science, Engineering and Technology – India. – 2022. – T. 9, № 10. – P. 19908–19913.
8. Khudoyorov S.S., Galperin L. V, Dunyashin N.S., Ermatov Z.D., Saidakmatov A.S., Abdurakhmonov M.M. Study interaction of molten metal and slag in arc welding // International Journal Of Advanced Research in Science, Engineering and Technology – India. – 2022. – T. 9, № 9. – P. 19771–19775.

References

1. Kuznetsov M.A., Zernin E.A. [Nanotechnologies and nanomaterials in welding production (Review)] // Svarochnoe proizvodstvo. – 2010. – No. 12. (In Russ.).
2. Moravetskij S.I. [Detachability of the slag crust in arc welding (Review). Part 1. Mechanism of chemical adhesion of the slag crust to the weld metal] // Avtomaticheskaya svarka. – 2011. – No. 1. (In Russ.).
3. Moravetskij S.I. [Detachability of the slag crust in arc welding (Review)]. Ch. 2. Kharakter vliyaniya osnovnykh faktorov na otdelimost' shlakovoj korki // Avtomaticheskaya svarka. – 2011. – No. 2. (In Russ.).
4. Podgaetskij V.V., Kuz'menko V.G. [Welding Slags. Reference Manual. – Kiev]. – 253 s. – 1988. (In Russ.).
5. S.V. Naumov, A.E. Kanina, A.M. Ignatova, M.N. Ignatov. O fraktsionnom sostave svarochnykh flyusov // Nauchno-tekhnicheskij vestnik Povolzh'ya. – 2013. – No. 2. (In Russ.).
6. Yu.V. Adkina, A.I. Nikolaev, V.B. Petrov, N.M. Putintsev. Legiruyushchie elementy v mineral'nykh i sinteticheskikh komponentakh svarochnykh materialov // Zhurn. prikl. khimii. – 1964. – Vol. 83, No. 12. (In Russ.).
7. Khudoyorov S.S., Galperin L. V, Dunyashin N.S., Ermatov Z.D., Rahmatullayeva N.T., Abdullaev M.Z. Investigation of the interaction of metal with complex gases in the development of the composition of ceramic fluxes for automatic arc welding of low-carbon and low-alloy steels // International Journal Of Advanced Research in Science, Engineering and Technology – India. – 2022. – Vol. 9, No. 10. – P. 19908–19913.
8. Khudoyorov S.S., Galperin L. V, Dunyashin N.S., Ermatov Z.D., Saidakmatov A.S., Abdurakhmonov M.M. Study interaction of molten metal and slag in arc welding // International Journal Of Advanced Research in Science, Engineering and Technology – India. – 2022. – Vol. 9, No. 9. – P. 19771–19775.

ТРАНСПОРТ И ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

Статья поступила в редакцию: 01.10.2026
Статья принята к публикации: 09.10.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 621.22:621.56

DOI: 10.32743/UniTech.2026.152.11.23524

Экспериментальный метод дополнительного охлаждения гидравлической рабочей жидкости

Абдуазизов Набижон Азаматович
д-р техн. наук, проф.
Навоийский государственный горно-технологический университет
Республика Узбекистан, г. Навои
E-mail: jurayevakbar@mail.ru

Жураев Акбар Шавкатович
PhD, доц.
Навоийский государственный горно-технологический университет
Республика Узбекистан, г. Навои

Исматов Адхамжон Алибек угли
ст. преп
Навоийский государственный горно-технологический университет
Республика Узбекистан, г. Навои

Experimental method for additional cooling of hydraulic working fluid

Abduazizov Nabijon Azamatovich
doctor of technical sciences
Prof., Navoi State University of Mining and Technologies
Republic of Uzbekistan, Navoi

Zhuraev Akbar Shavkatovich
PhD, Associate Professor
Navoi State University of Mining and Technologies
Republic of Uzbekistan, Navoi

Ismatov Adkhamjon Alibek ugli
senior Lecturer
Navoi State University of Mining and Technologies
Republic of Uzbekistan, Navoi

Библиографическое описание: Абдуазизов Н.А., Жураев А.Ш., Исматов А.А.У. Экспериментальный метод дополнительного охлаждения гидравлической рабочей жидкости // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23524

Аннотация

Повышение температуры рабочей жидкости является одним из факторов, определяющих тепловое состояние гидравлических систем при продолжительной эксплуатации и повышенных нагрузках. Тепловыделение, обусловленное гидравлическими, объемными и механическими потерями, приводит к нагреву масла и изменению его эксплуатационных свойств. В связи с этим обеспечение отвода избыточной теплоты и поддержание рационального температурного режима рабочей жидкости представляет практический интерес при совершенствовании гидравлического оборудования.

В статье представлен экспериментальный метод дополнительного охлаждения гидравлической рабочей жидкости с использованием спирального теплообменного элемента, размещенного непосредственно в объеме масляного бака. Разработана экспериментальная установка и определены характерные контрольные зоны для исследования теплового процесса: температура рабочей жидкости на входе в бак Твх, температура в зоне спирального теплообменника Тсп и температура рабочей жидкости на выходе из бака Твых. Предложена последовательность проведения экспериментальных исследований, позволяющая оценивать характер изменения температурных параметров во времени.

Результаты термографического контроля подтверждают формирование температурного градиента между нагретой рабочей жидкостью и охлаждаемой поверхностью спирального элемента. Представленная расчетная оценка температурной динамики используется для анализа общего характера переходного процесса и не трактуется как определение энергетического КПД системы. Полученные результаты могут быть использованы при дальнейшем совершенствовании систем тепловой стабилизации гидравлических приводов машин, работающих при продолжительных и переменных нагрузках.

Abstract

The temperature increase of hydraulic working fluid is one of the factors determining the thermal condition of hydraulic systems during prolonged operation and under increased loads. Heat generation caused by hydraulic, volumetric and mechanical losses results in oil heating and changes in its operating properties. Therefore, removal of excess heat and maintenance of a rational temperature range of the working fluid are of practical importance for improving hydraulic equipment.

This paper presents an experimental method for additional cooling of hydraulic working fluid using a spiral heat-exchange element installed directly inside the oil reservoir. An experimental setup was developed and characteristic control zones of the thermal process were defined: working-fluid temperature at the reservoir inlet Tin, temperature in the spiral heat-exchanger zone Tsp, and working-fluid temperature at the reservoir outlet Tout. A sequence of experimental procedures is proposed to evaluate changes in temperature parameters over time.

Thermographic observations confirm the formation of a temperature gradient between the heated hydraulic fluid and the cooled surface of the spiral element. The presented calculated temperature dynamics are used to characterize the transient thermal process and are not interpreted as the energy efficiency of the cooling system. The results may be used in further development of thermal stabilization systems for hydraulic drives operating under prolonged and variable loads.

Ключевые слова: гидравлическая рабочая жидкость, температура масла, дополнительное охлаждение, спиральный теплообменник, масляный бак, теплообмен, термографический контроль.

Keywords: hydraulic working fluid, oil temperature, additional cooling, spiral heat exchanger, oil reservoir, heat transfer, thermographic monitoring.

Введение

Гидравлический привод широко применяется в технологических машинах благодаря высокой удельной мощности, возможности плавного регулирования рабочих параметров и передачи значительных усилий при сравнительно небольших габаритах исполнительных механизмов. Вместе с тем работа гидравлической системы сопровождается неизбежными энергетическими потерями в насосах, регулирующей и распределительной аппаратуре, трубопроводах и исполнительных механизмах. Значительная часть этих потерь преобразуется в теплоту и передается циркулирующей рабочей жидкости [4, 10, 8, 2].

Температурное состояние рабочей жидкости непосредственно связано с изменением ее физико-механических и эксплуатационных характеристик. Особое значение имеет температурная зависимость вязкости. При повышении температуры вязкость гидравлического масла снижается, что может сопровождаться изменением внутренних утечек и рабочих характеристик гидравлических агрегатов. Экспериментальные исследования показывают существенную связь температуры гидравлического масла с характеристиками насосов и гидроприводов [1, 3].

В процессе продолжительной эксплуатации формируется взаимосвязанный тепловой цикл. Рабочая жидкость, поступая из масляного бака в гидравлический контур, последовательно проходит через насос, регулирующую аппаратуру, трубопроводы и исполнительные механизмы. Возникающие при этом энергетические потери вызывают ее повторный нагрев. Нагретая жидкость возвращается в бак, где часть накопленной теплоты должна быть отведена в окружающую среду либо через специальное охлаждающее устройство.

Масляный бак одновременно выполняет функцию резервуара рабочей жидкости и участвует в естественном отводе теплоты. Геометрические параметры бака, уровень масла и характер движения рабочей жидкости оказывают влияние на теплоотдачу и пространственное распределение температуры [9].

Общий тепловой баланс рабочей жидкости может быть представлен как разность между интенсивностью тепловыделения и теплоотвода:

$$Q_{\text{нак}} = Q_{\text{ген}} - Q_{\text{отв}} \quad (1)$$

где $Q_{\text{нак}}$-скорость накопления тепловой энергии в рабочей жидкости; $Q_{\text{ген}}$-тепловая мощность, формируемая вследствие энергетических потерь гидравлической системы; $Q_{\text{отв}}$-суммарная тепловая мощность, отводимая системой охлаждения и поверхностями гидравлической системы.

При условии $Q_{\text{ген}} > Q_{\text{отв}}$ температура рабочей жидкости продолжает возрастать. При приближении отводимой тепловой мощности к количеству генерируемой теплоты система переходит к квазистационарному температурному состоянию. Современные исследования теплового состояния гидравлических систем подтверждают необходимость совместного учета источников тепловыделения, теплоотдачи бака и параметров охлаждающей системы [4, 10, 5, 8].

Для отвода избыточной теплоты в гидравлических системах используются воздушные и жидкостные теплообменники, радиаторы, внешние охладители и различные схемы регулирования потока через охлаждающий контур. В настоящем исследовании рассматривается иной принцип организации дополнительного теплоотвода — размещение охлаждаемого спирального теплообменного элемента непосредственно в объеме рабочей жидкости масляного бака. При таком подходе исследуемый теплообменник не включается последовательно в основную гидравлическую магистраль.

Цель исследования — разработка и экспериментальная оценка метода дополнительного охлаждения гидравлической рабочей жидкости посредством спирального теплообменного элемента, размещенного непосредственно в масляном баке, с оценкой изменения температур в характерных контрольных зонах процесса охлаждения.

Материалы и методы

Конструкция экспериментальной установки. Для исследования процесса дополнительного охлаждения гидравлической рабочей жидкости разработана экспериментальная установка, в которой теплообмен между нагретым маслом и охлаждающим контуром осуществляется посредством медного спирального теплообменного элемента, размещенного непосредственно внутри масляного бака. В отличие от традиционной схемы с внешним охладителем, исследуемый способ предусматривает непосредственный отвод теплоты из объема рабочей жидкости через поверхность погруженной спирали.

Рисунок 1. Общий вид экспериментального контура дополнительного охлаждения

Конструкция спирального теплообменного элемента. Основным функциональным элементом экспериментальной установки является спиральный теплообменник из медной трубки. Спираль погружается в объем гидравлической рабочей жидкости, а хладагент циркулирует внутри трубки. За счет температурного напора теплота передается от нагретого масла к наружной поверхности спирали и далее к хладагенту.

В рассматриваемой конструкции наружный диаметр трубки составляет 6,2 мм, количество витков -20, высота рабочей части - 250 мм. Расчетная длина трубки составляет около 7,16 м, а наружная поверхность теплообмена – около 0,139м². В настоящей статье данные параметры характеризуют экспериментальный образец; задача их оптимизации не рассматривается.

Таблица 1. Основные параметры спирального теплообменного элемента

Параметр	Обозначение	Значение
Наружный диаметр трубки	d	6,2 мм
Количество витков	n	20
Высота спирали	H	250 мм
Расчетная длина трубки	L	≈ 7,16 м
Активная поверхность теплообмена	A	≈ 0,139 м²

Система дополнительного охлаждения. Для создания температурного потенциала на поверхности спирального теплообменника используется автономный компрессионный холодильный контур. Функционально система включает компрессор, конденсатор с принудительным воздушным охлаждением, фильтр-осушитель, дросселирующий участок и спиральный теплообменный элемент. После сжатия хладагент поступает в конденсатор, затем после дросселирования его давление и температура снижаются, после чего в спирали он воспринимает теплоту от окружающей гидравлической жидкости.

Компрессор → конденсатор → дросселирование → спираль → компрессор (2)

Таким образом, теплоотвод организован без непосредственного смешивания гидравлической рабочей жидкости и хладагента. Исследуемый спиральный элемент не создает дополнительного последовательного гидравлического сопротивления в основной магистрали.

Контрольные точки температурного состояния Для оценки теплового состояния экспериментальной системы выделены три характерные зоны: Твх — температура рабочей жидкости на входе в бак; Тсп — температура в зоне расположения спирального теплообменного элемента; Твых — температура рабочей жидкости в выходной зоне масляного бака. Совместное рассмотрение указанных параметров позволяет анализировать направление и развитие процесса дополнительного охлаждения.

В сформировавшемся режиме общий характер температурного поля может быть представлен соотношением Твх > Твых > Тсп. Данное соотношение рассматривается как характеристика направления теплового процесса, а не как неизменное условие для каждого момента переходного режима.

Методика эксперимента. Экспериментальное исследование проводилось последовательно. Перед началом испытания проверялись герметичность соединений холодильного контура, работоспособность компрессора и состояние температурного контроля. Затем рабочая жидкость доводилась до исходного теплового состояния, после чего включался компрессорный контур и регистрировались изменения температурных параметров.

Методика включала: 1) формирование исходного теплового состояния рабочей жидкости; 2) включение системы дополнительного охлаждения; 3) формирование температурного напора между маслом и спиралью; 4) наблюдение Твх, Тсп и Твых; 5) термографический контроль характерных зон; 6) обработку температурных данных.

$$\Delta T(t) = T_{вх}(t) - T_{вых}(t) \quad (3)$$

Относительное изменение температуры в выходной зоне для расчетной оценки определялось выражением:

$$\delta T = \left[\frac{(T_{вых,0} - T_{вых,t})}{T_{вых}}\right] \cdot 100\ \% \quad (4)$$

Показатель δT характеризует относительное изменение температуры и не является коэффициентом полезного действия или COP холодильной системы.

Результаты и обсуждение

Термографический контроль. Термографические наблюдения использовались для визуальной оценки теплового состояния отдельных участков экспериментальной системы. В разные моменты исследования были зарегистрированы радиометрические значения порядка 86,3°C для нагретой зоны, 71,8°C для зоны входа, 53,2°C для выходной зоны и 32,5°C в зоне спирального охлаждающего элемента.

Следует подчеркнуть, что эти значения получены в различные моменты времени и характеризуют радиометрическую температуру соответствующих поверхностей. Поэтому непосредственное вычитание указанных значений не использовалось для определения мгновенного перепада температуры, энергетической эффективности или коэффициента преобразования системы.

Расчетная оценка температурной динамики

Для анализа общего характера переходного процесса дополнительно рассмотрена расчетная динамика температурных параметров в течение 60 мин. Представленные значения не являются непрерывным рядом синхронных экспериментальных измерений и используются только как расчетный сценарий для интерпретации термической тенденции.

Таблица 2. Расчетная оценка температурной динамики

t, мин	Тсп, °C	Твх, °C	Твых, °C	ΔT, °C
0	68,0	71,8	70,0	1,8
5	55,5	72,4	66,0	6,4
10	47,5	72,1	62,4	9,7
15	42,5	71,7	59,5	12,2

t, мин	Тсп, °С	Твх, °С	Твых, °С	ΔТ, °С
20	39,0	71,3	57,3	14,0
25	36,8	70,9	55,7	15,2
30	35,3	70,5	54,5	16,0
35	34,3	70,1	53,7	16,4
40	33,6	69,8	53,2	16,6
45	33,2	69,5	52,8	16,7
50	32,8	69,2	52,5	16,7
60	32,5	68,8	52,1	16,7

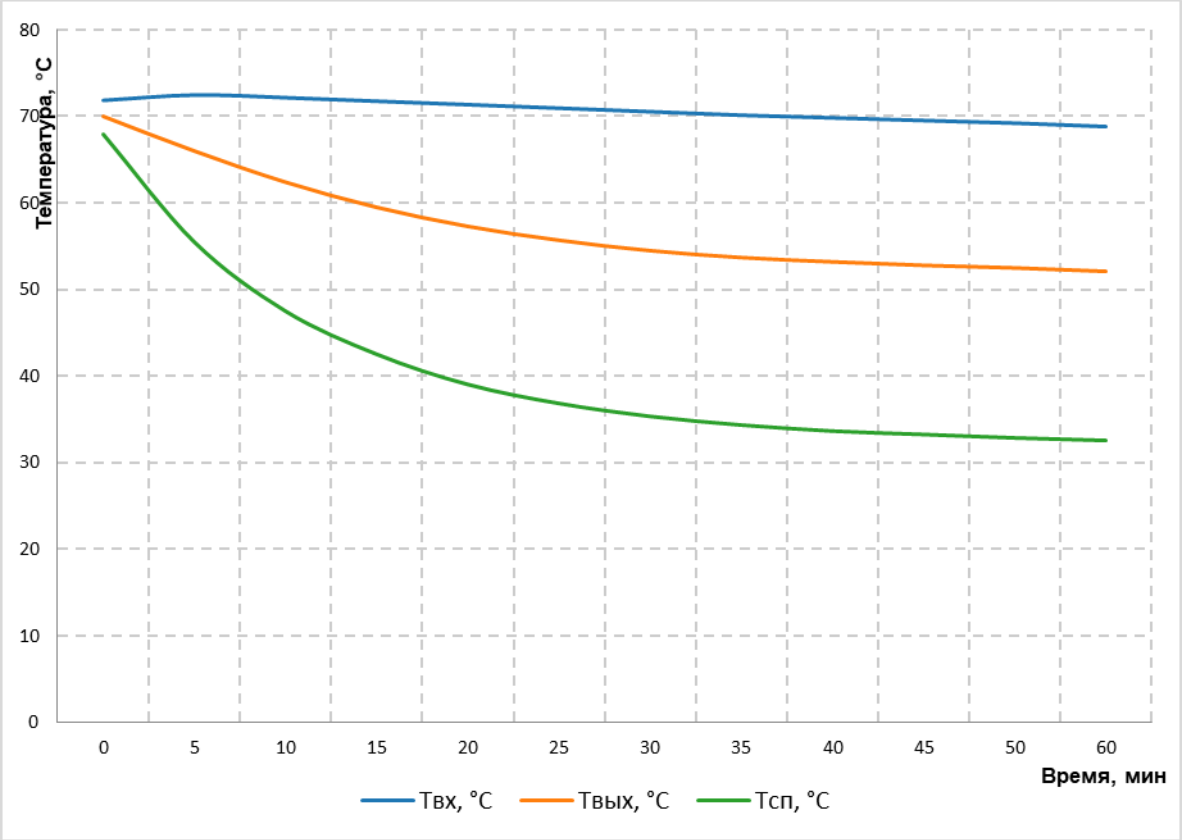


Рисунок 2. Расчетная динамика температурных параметров при дополнительном охлаждении

Расчетная оценка показывает, что на начальном этапе наиболее интенсивно изменяется температура в зоне спирального элемента. Одновременно снижается Твых, тогда как Твх изменяется значительно медленнее вследствие продолжающегося подвода теплоты со стороны гидравлического контура. Такой характер соответствует взаимодействию двух противоположных процессов: тепловыделения в гидравлической системе и теплоотвода в масляном баке.

В принятом расчетном сценарии температура рабочей жидкости в выходной зоне за 60 мин изменяется от 70,0 до 52,1 °С. Расчетное абсолютное снижение составляет 17,9 °С, а относительное изменение – 25,6 % от начального значения. Последняя величина характеризует только относительное изменение температуры в расчетном сценарии и не является энергетическим КПД системы охлаждения.По характеру расчетных кривых можно условно выделить три стадии: начальный интенсивный участок 0 – 25 мин; переходный

участок 25 – 40 мин; участок замедленного изменения 40 – 60 мин, соответствующий приближению к квазистационарному тепловому режиму. При этом полного установившегося состояния за 60 мин не утверждается.

Обсуждение результатов

Физический смысл наблюдаемого процесса определяется совместным действием тепловыделения и теплоотвода. Рабочая жидкость, проходя через насосы, регулирующую аппаратуру, трубопроводы и исполнительные механизмы, получает дополнительную теплоту. После возвращения в бак часть этой теплоты отводится через стенки бака и спиральный теплообменный элемент. Поэтому температура входной зоны может оставаться сравнительно высокой даже при заметном снижении температуры в зоне спирали.

$$m \cdot cp \cdot \frac{dT}{dt} = \dot{Q}\text{гс} - \dot{Q}\text{охл} - \dot{Q}\text{окр} \quad (5)$$

где m — масса рабочей жидкости в масляном баке, кг; c_p — удельная теплоёмкость рабочей жидкости, Дж/(кг·К); T — средняя температура рабочей жидкости в баке, °C (при вычислении изменения температуры допускается использование K); t — время, с; dT/dt — скорость изменения средней температуры рабочей жидкости во времени, К/с; $\dot{Q}$гс — тепловая мощность, поступающая от гидравлической системы, Вт; $\dot{Q}$охл — тепловая мощность, отводимая дополнительным охлаждающим устройством, Вт; $\dot{Q}$окр — тепловая мощность, отводимая в окружающую среду через поверхности бака, Вт. Левая часть уравнения (5), $m \cdot c_p \cdot dT/dt$, характеризует скорость изменения тепловой энергии рабочей жидкости, Вт. При $\dot{Q}$охл + $\dot{Q}$окр > $\dot{Q}$гс выполняется $dT/dt < 0$, то есть средняя температура рабочей жидкости снижается.

Предлагаемое решение отличается локализацией дополнительного теплоотвода непосредственно в объеме масляного бака. На данном этапе исследования не выполнялась полная энергетическая идентификация системы с определением U, UA, COP и оптимальных геометрических параметров спирали; эти вопросы требуют отдельного исследования.

Заключение

Разработан экспериментальный метод дополнительного охлаждения гидравлической рабочей жидкости с использованием медного спирального теплообменного элемента, размещенного непосредственно в объеме масляного бака.

Для оценки теплового состояния выделены три характерные зоны: Твх, Тсп и Твых. Их совместный анализ позволяет оценивать направление и развитие дополнительного теплоотвода.

Термографический контроль в разные моменты исследования зарегистрировал радиометрические значения порядка 86,3 °C, 71,8 °C, 53,2 °C и 32,5 °C в различных характерных зонах. Эти значения не интерпретировались как синхронный перепад температуры.

В расчетном сценарии 60-минутного процесса температура в выходной зоне изменяется от 70,0 до 52,1 °C, что соответствует расчетному снижению на 17,9 °C или 25,6 % относительно начального значения. Показатель 25,6 % не является КПД холодильной системы.

Характер расчетных кривых указывает на интенсивный начальный этап охлаждения и последующее замедление температурных изменений по мере приближения системы к квазистационарному состоянию.

Полученные результаты подтверждают целесообразность дальнейшего экспериментального исследования погруженного спирального теплообменника как средства дополнительного теплоотвода от гидравлической рабочей жидкости непосредственно в масляном баке.

Список литературы

1. Ставиньский Л., Косуцкий А., Цебуляк М. Гурняк вель Гурский А., Граля М. Stawiński Ł., Kosucki A., Cebulak M., Górniak vel Górski A., Grala M. Investigation of the Influence of Hydraulic Oil Temperature on the Variable-Speed Pump Performance // Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability. – 2022. – Т. 24, № 2. – P. 289–296. – DOI: 10.17531/ein.2022.2.10.
2. Gupta N., Kini P., Gupta S. et al. Six Sigma Based Modeling of the Hydraulic Oil Heating under Low Load Operation // Engineering Science and Technology, an International Journal. – 2021. – Т. 24, № 1. – P. 11–21. – DOI: 10.1016/j.jestch.2020.12.002.
3. Hashim W.M., Al-Salihi H.A., Al Zubaidi F.N. Effects of Temperature on the Properties of HL32 Oil in the Conventional Hydraulic Actuators // Heliyon. – 2022. – Т. 8, № 12. – DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e11831.
4. Hu K., Zhang W. Accurate Oil Temperature Prediction Model and Oil Refilling Parameters Optimization for Hydraulic Closed-Circuit System // Applied Sciences. – 2024. – Т. 14, № 19. – Art. 8885. – DOI: 10.3390/app14198885.
5. Li D., Dong S., Wang J., Li Y. Temperature Dynamic Characteristics Analysis and Thermal Load Dissipation Assessment for Airliner Hydraulic System in a Full Flight Mission Profile // Machines. – 2022. – Т. 10, № 4. – Art. 258. – DOI: 10.3390/machines10040258.
6. Liu S., Yan Q., Khoo B.C. Thermal Effect on Cavitation Characteristics of a Hydraulic Torque Converter // Numerical Heat Transfer, Part A: Applications. – 2022. – Т. 82. – P. 31–52. – DOI: 10.1080/10407782.2022.2078613.
7. Siddiqui M.A. Sludge Formation Analysis in Hydraulic Oil of Load Haul Dumper 811MK V Machine Running at Elevated Temperatures for Bioenergy Applications // International Journal of Chemical Engineering. – 2021. – Art. 4331809. – DOI: 10.1155/2021/4331809.
8. Yan G., Jin Z., Yang M., Yao B. The Thermal Balance Temperature Field of the Electro-Hydraulic Servo Pump Control System // Energies. – 2021. – Т. 14, № 5. – Art. 1364. – DOI: 10.3390/en14051364.

9. Zhai F., Wang X., He Z., Chen Y., Ye Z., Yao J. Analysis of Natural Heat Dissipation Capacity of Hydraulic Tank and Relevant Influencing Factors // Machines. – 2022. – T. 10, № 11. – Art. 991. – DOI: 10.3390/machines10110991.
10. Zhang Q., Liu X., Tong Z., Cheng Z. Research on Heat Generation Law and Cooling System Performance of Hydraulic System of Combined Machine Tool // Energies. – 2023. – T. 16, № 21. – Art. 7322. – DOI: 10.3390/en16217322.

References

1. Stawiński Ł., Kosucki A., Cebulak M., Górniak vel Górski A., Grala M. Stawiński Ł., Kosucki A., Cebulak M., Górniak vel Górski A., Grala M. Investigation of the Influence of Hydraulic Oil Temperature on the Variable-Speed Pump Performance. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability, 2022, vol. 24 // Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability. – 2022. – Vol. 24, No. 2. – P. 289–296. – DOI: 10.17531/ein.2022.2.10.
2. Gupta N., Kini P., Gupta S., et al. Six Sigma Based Modeling of the Hydraulic Oil Heating under Low Load Operation. Engineering Science and Technology, an International Journal, 2021, vol. 24, no. 1, P. 11–21. DOI: 10.1016/j.jestch.2020.12.002.
3. Hashim W.M., Al-Salihi H.A., Al Zubaidi F.N. Effects of Temperature on the Properties of HL32 Oil in the Conventional Hydraulic Actuators. Heliyon, 2022, vol. 8, no. 12, art. e11831. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e11831.
4. Hu K., Zhang W. Accurate Oil Temperature Prediction Model and Oil Refilling Parameters Optimization for Hydraulic Closed-Circuit System. Applied Sciences, 2024, vol. 14, no. 19, art. 8885. DOI: 10.3390/app14198885.
5. Li D., Dong S., Wang J., Li Y. Temperature Dynamic Characteristics Analysis and Thermal Load Dissipation Assessment for Airliner Hydraulic System in a Full Flight Mission Profile. Machines, 2022, vol. 10, no. 4, art. 258. DOI: 10.3390/machines10040258.
6. Liu S., Yan Q., Khoo B.C. Thermal Effect on Cavitation Characteristics of a Hydraulic Torque Converter. Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, 2022, vol. 82, P. 31–52. DOI: 10.1080/10407782.2022.2078613.
7. Siddiqui M.A. Sludge Formation Analysis in Hydraulic Oil of Load Haul Dumper 811MK V Machine Running at Elevated Temperatures for Bioenergy Applications. International Journal of Chemical Engineering, 2021, art. 4331809. DOI: 10.1155/2021/4331809.
8. Yan G., Jin Z., Yang M., Yao B. The Thermal Balance Temperature Field of the Electro-Hydraulic Servo Pump Control System. Energies, 2021, vol. 14, no. 5, art. 1364. DOI: 10.3390/en14051364.
9. Zhai F., Wang X., He Z., Chen Y., Ye Z., Yao J. Analysis of Natural Heat Dissipation Capacity of Hydraulic Tank and Relevant Influencing Factors. Machines, 2022, vol. 10, no. 11, art. 991. DOI: 10.3390/machines10110991.
10. Zhang Q., Liu X., Tong Z., Cheng Z. Research on Heat Generation Law and Cooling System Performance of Hydraulic System of Combined Machine Tool. Energies, 2023, vol. 16, no. 21, art. 7322. DOI: 10.3390/en16217322.

Статья поступила в редакцию: 30.10.2026
Статья принята к публикации: 06.11.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 338.45:629.33:004.9(575.1)

DOI: 10.32743/UniTech.2026.152.11.23687

Цифровая трансформация автомобильной промышленности Узбекистана

Мамасалиева Мукаддас Ибадуллаевна
доц.
Ташкентский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: mamasaliyevamuqaddas@gmail.com

Digital transformation of the automotive industry in Uzbekistan

Mamasalieva Mukaddas Ibadullaevna
Associate Professor
Tashkent State Technical University
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

В статье анализируются ключевые тренды, достижения и перспективы комплексной цифровой трансформации в автомобилестроительном секторе Республики Узбекистан. На основе опыта ведущих предприятий отрасли (UzAuto Motors, ADM Jizzakh, BYD Uzbekistan Factory) подробно рассматриваются процессы промышленной роботизации, внедрения систем искусственного интеллекта, сквозного управления жизненным циклом продукта (PLM) и локализации высокотехнологичных цифровых компонентов. Современный транспорт является неотъемлемой частью социально-экономического развития государства. Рост автомобилизации, увеличение объёмов грузовых и пассажирских перевозок, урбанизация и развитие промышленности приводят к значительному увеличению транспортной нагрузки на окружающую среду. Особое внимание уделено переходу к выпуску интеллектуального транспорта на новых источниках энергии (NEV). Материал содержит научно обоснованные практические рекомендации по глубокой модернизации транспортной инфраструктуры республики, направленные на системное повышение энергоэффективности, цифровизацию городского общественного транспорта и обеспечение экологической безопасности. В работе обоснована необходимость ускоренного внедрения интеллектуальных систем управления дорожным движением (ИТС) в повышении эффективности транспортных процессов, снижении энергозатрат и уменьшении негативного воздействия транспорта на окружающую среду. Также предложены эффективные подходы к интеграции автопрома с

Библиографическое описание: Мамасалиева М.И. Цифровая трансформация автомобильной промышленности Узбекистана // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23687

национальной транспортной сетью для оптимизации управления транспортными потоками логистических процессов в современных условиях для устойчивого развития цифровой экономики.

Abstract

This article analyses the key trends, achievements and prospects for comprehensive digital transformation in the automotive sector of the Republic of Uzbekistan. Drawing on the experience of leading companies in the sector (UzAuto Motors, ADM Jizzakh, BYD Uzbekistan Factory), it examines in detail the processes of industrial robotisation, the implementation of artificial intelligence systems, end-to-end product lifecycle management (PLM) and the localisation of high-tech digital components. Modern transport is an integral part of a country's socio-economic development. The growth in car ownership, the increase in freight and passenger transport volumes, urbanisation and industrial development are leading to a significant rise in the environmental impact of transport. Particular attention is paid to the transition towards the production of intelligent transport vehicles powered by new energy sources (NEVs). This paper contains scientifically grounded practical recommendations for the comprehensive modernisation of the republic's transport infrastructure, aimed at systematically improving energy efficiency, digitising urban public transport and ensuring environmental safety. The paper justifies the need for the accelerated introduction of intelligent traffic management systems (ITS) to improve the efficiency of transport processes, reduce energy consumption and minimise the negative impact of transport on the environment. Effective approaches are also proposed for integrating the automotive industry with the national transport network in order to optimise the management of transport flows within logistics processes under current conditions, thereby supporting the sustainable development of the digital economy.

Ключевые слова: цифровая трансформация, автоматизация, роботизация, электромобили, транспортные инновации, транспортная модернизация, устойчивый транспорт, локализация производства.

Keywords: digital transformation, automation, robotisation, electric vehicles, transport innovations, transport modernisation, sustainable transport, localisation of production.

Введение

В последние годы в Узбекистане наблюдается стремительный рост интереса к экологически чистому транспорту, что обусловлено как мировыми тенденциями, так и целенаправленной государственной политикой по развитию электромобильности. Особенно динамично этот процесс развивается в городе Ташкенте, где сосредоточена крупнейшая в стране транспортная загрузка и наиболее развитая техническая инфраструктура. По данным статистических данных за последние годы парк электромобилей в столице увеличился многократно, а общее количество зарегистрированных электротранспортных средств в республике превышает несколько десятков тысяч. Параллельно активно расширяется зарядная инфраструктура: только в Ташкенте функционируют сотни общественных и частных зарядных станций, включая высокомощные установки последнего поколения. По данным Статкомитета Республики Узбекистан в нашей

стране 122,7 тысячи электромобилей, более 70 % из них - в Ташкенте. Следом идут Ташкентская область - 9546, Самарканд - 4870, Хорезм - 3784, в Сурхандарье - 429 электромобилей. [2,3]

Автомобильный транспорт остается преобладающим средством передвижения и в значительной степени зависит от ископаемого топлива. Стремясь снизить воздействие транспортного сектора на окружающую среду, стратегия «Зеленой экономики» Узбекистана [6] определила электромобили на аккумуляторах (BEV) как перспективное решение. По сравнению с двигателями внутреннего сгорания (ДВС) они обладают преимуществами в плане эффективности, экологической устойчивости и отсутствия выбросов. Однако выход BEV на рынок не только легковых автомобилей связан с рядом проблем. Длительное время зарядки и ограниченная емкость батарей для больших расстояний препятствуют их внедрению в таких сегментах, как грузовики и автобусы. Автомобильная промышленность Узбекистана исторически является локомотивом тяжелой индустрии Центральной Азии. Однако современный глобальный рынок требует от автопроизводителей не просто наращивания объемов выпуска, а кардинальной гибкости, высокой скорости вывода моделей на рынок (Time-to-Market). [4]

Материалы и методы

В условиях четвертой промышленной революции (Индустрии 4.0) ключевым фактором конкурентоспособности узбекского автопрома стала цифровая трансформация - сквозная интеграция IT-технологий во все бизнес-процессы: от проектирования до послепродажного обслуживания. Актуальность исследования обусловлена масштабным переходом сектора от традиционного машиностроения к производству подключенного и экологически чистого транспорта, что требует пересмотра операционных стратегий крупнейших игроков рынка. [6,7]

Методологическую основу данного исследования составил комплексный сравнительный и системный анализ операционной деятельности ключевых автопроизводителей Республики Узбекистан: АО «UzAuto Motors» (г. Асака, г. Питнак), мультибрендового завода «ADM Jizzakh» и совместного предприятия «BYD Uzbekistan Factory» (СЭЗ «Джизак»). [8]

В качестве эмпирических данных использовались официальные статистические отчеты Агентства статистики при Президенте Республики Узбекистан за 2024-2025 гг., корпоративные пресс-релизы автопроизводителей, а также международные аналитические обзоры (включая материалы S&P Global Ratings и OICA). Анализ процессов автоматизации базировался на оценке доли роботизированных рабочих мест в сварочных, покрасочных и сборочных цехах, а также на уровне интеграции ERP/PLM систем в кластерах локализации. (Таблица 1)

Таблица 1. Количество произведенных автомобилей в Республике Узбекистан (за январь-декабрь, штук)

№	Промышленная продукция	2024	2025
1	Грузовые автомобили	3558	4460
2	Легковые автомобили	429 139	457 883

№	Промышленная продукция	2024	2025
3	Специализированные автомобили	25 464	54 301
4	“Cobalt”	164 887	161 152
5	“Damas”	101 912	93 681
6	“Gentra”	12 837	-
7	“Tracker”	45 918	50 362
8	“Onix”	41 661	33 122
9	“KIA”	22 063	26 317
10	“Chery”	7 072	9354
11	“Haval”	3 315	9 344
12	“BYD”	4 004	20 200
13	“Tank 500”	-	50
14	“LADA”	6	-

Результаты и обсуждения

Автомобилестроение – самая молодая отрасль, созданная в нашем независимом государстве. В невиданно короткие сроки в нашей стране создано и успешно развивается уникальное по своей оснащенности производство автомобилей. Новая отрасль сегодня становится мощным локомотивом развития всей экономики Узбекистана. [3,4]

Исследование показало, что основной фокус цифровизации в автопроме Узбекистане к 2026 году сместился с автоматизации отдельных станков на создание комплексных «умных заводов» (Smart Factories). [5] Были выделены три ключевых вектора трансформации:

1. Роботизация базовых платформ. На заводах АО «UzAuto Motors» внедрение глобальных платформ для выпуска моделей Chevrolet Tracker и Onix позволило довести уровень автоматизации в сварочных и покрасочных цехах до рекордных 80-85 %. Использование промышленных роботов Fanuc обеспечило высокую воспроизводимость геометрии кузова и снизило процент брака на этапе сварки на 14 %.

2. Гибкое мультибрендовое производство. Завод ADM Jizzakh успешно внедрил интеллектуальную систему управления качеством на базе машинного зрения. Автоматизация штамповочного комплекса *ADM Stamping* (роботы ABB) позволила осуществлять быструю переналадку линий под разные типы кузовов (от компактного Kia Sonet до седана Kia K3) за рекордные 8-10 минут. Это позволило предприятию получить долгосрочный кредитный рейтинг «B» со стабильным прогнозом от S&P Global Ratings.

3. Экосистема NEV (New Energy Vehicles). Запуск завода *BYD Uzbekistan Factory* форсировал цифровую интеграцию в сегменте электромобилей и гибридов (модели Chazor и Song Plus DM-i). Процесс диагностики, калибровки интеллектуальных систем помощи водителю (ADAS) и прошивки электронных блоков управления (ECU) на 100 % переведен на облачные платформы производителя.

Исходя из этого можно сказать, что автопром Узбекистана успешно преодолел этап первичной автоматизации и вошел в фазу глубокой качественной синергии IT и машиностроения. Однако, сопоставляя опыт Узбекистана с мировыми лидерами (например, КНР), можно выделить ряд сдерживающих факторов. [5]

Во-первых, глубина локализации цифровых компонентов (микрочипов, контроллеров, элементов литий-ионных батарей) внутри республики остается на начальном уровне, что сохраняет зависимость от импорта программно-аппаратных комплексов. Во-вторых, масштабная Индустрия 4.0 обострила дефицит «цифровых воротничков» - инженеров по промышленной робототехнике и кибербезопасности. Данный вызов требует тесной интеграции производственных гигантов с ведущими вузами, в частности, Туринским политехническим университетом в Ташкенте, в рамках программ дуального обучения.

Заключение

Таким образом, изменения, происходящие в настоящее время в макроэкономике, затрагивают все стороны жизни общества. Известно, что экологическая безопасность транспортных средств является важнейшей частью промышленной экологии, которая рассматривает воздействие техники на окружающую среду, определяемое тепловым и виброакустическим влиянием на окружающую среду. Последовательная государственная поддержка, инвестиции в локализацию производства и интеграция международного опыта обеспечат дальнейшее укрепление позиций страны на глобальном рынке экологически чистого транспорта. [9,10]

Цифровая трансформация автомобильной промышленности Узбекистана позволила сектору выйти на качественно новый технологический уровень. Переход от крупноузловой сборки к роботизированным комплексам полного цикла (CKD) и производству интеллектуального электранспорта (NEV) трансформировал структуру экономики регионов (в особенности Джизакской и Андижанской областей). Цифровизация цепочек поставок и внедрение искусственного интеллекта на конвейерах гарантируют Узбекистану сохранение статуса технологического лидера автомобилестроения в Центральной Азии.

Список литературы

1. Гурский, А.С. Эксплуатационные материалы для транспортных средств: учебное пособие / А.С. Гурский, Е.Л. Савич. – Минск: РИВШ, 2025. – 327 с.
2. Мамасалиева, М.И. Анализ текущего состояния и перспективы развития электромобилей в городе Ташкенте / М.И. Мамасалиева, К.Р. Отаназаров // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. – 2026. – № 2 (143). – DOI: 10.32743/UniTech.2026.143.2.21983.
3. Мамасалиева, М.И. Применение инновационных технологий в автомобилестроении гибридов в Республике Узбекистан / М.И. Мамасалиева, Т.К. Бекетов // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. – 2026. – № 1 (142). – DOI: 10.32743/UniTech. 2026.142.1.21664.
4. Мамасалиева, М.И. ТОП-10 транспортных технологий и инноваций в 2025 году для Узбекистана / М.И. Мамасалиева, Т.К. Бекетов // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. – 2026. – № 2 (143). – DOI: 10.32743/UniTech.2026.143.2.21936.

5. Kazopoulo, M. A stated-preference approach towards assessing a vehicle inspection and maintenance program / M. Kazopoulo, I. Kaysi, M. El Fadel // Transportation Research Part D: Transport and Environment. – 2007. – T. 12, № 5. – P. 358–370. – DOI: 10.1016/j.trd. 2007.04.002.
6. Mamasalieva, M.I. State of fuel and energy resources and their rational use in the agro-industrial sector of the Republic of Uzbekistan / M.I. Mamasalieva // E3S Web of Conferences: Proceedings of the V International Scientific Conference «Construction Mechanics, Hydraulics and Water Resources Engineering» (CONMECHYDRO. – 2023. – T. 401. – Art. 03052. – DOI: 10.1051/e3sconf/202340103052.
7. Z. Musabekov, A. Ismatov, T. Beketov, K. Ergashov. Method for effective use of solar and hydrogen energy // AIP Conference Proceedings: 4th International Scientific and Technical Conference on Actual Issues of Power Supply Systems (ICAIPSS. – 2025. – DOI: 10.1063/5.0305802.
8. Транспорт и связь в Узбекистане: статистический сборник / Национальный комитет по статистике Республики Узбекистан. – Ташкент: Национальный комитет по статистике Республики Узбекистан, 2025. – 58 с.
9. А.И. Грушевский. Экологические свойства автомобильных эксплуатационных материалов: учебное пособие. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2015. – 220 с.
10. Ютт, В.Е. Электрооборудование автомобилей и электромобилей: учебник для вузов / В.Е. Ютт. – Москва: Горячая линия–Телеком, 2025. – 480 с.

References

1. Gursky, A.S., Savich, E.L. Operational Materials for Vehicles. Study Guide. Minsk: RIVSh, 2025. 327 P. (In Russ.).
2. Mamasalieva, M.I., Otanazarov, K.R. Analysis of the Current Status and Prospects for the Development of Electric Vehicles in the City of Tashkent // Universum: Technical Sciences: Electronic Scientific Journal. – 2026. – DOI: 10.32743/UniTech.2026.143.2.21983(In [Электронный ресурс]. – URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/21983. (In Russ.).
3. Mamasalieva M.I., Beketov T.K. The application of innovative technologies in the manufacture of hybrid vehicles in the Republic of Uzbekistan // Universum: Technical Sciences: electronic scientific journal. – 2026. – DOI: 10.32743/UniTech.2026.142.1.21664(In [Электронный ресурс]. – URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/21664. (In Russ.).
4. Mamasalieva, M.I., Beketov, T.K. Top 10 transport technologies and innovations for Uzbekistan in 2025 // Universum: Technical Sciences: Electronic Scientific Journal. – 2026. – DOI: 10.32743/UniTech.2026.143.2.21936(In [Электронный ресурс]. – URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/21936. (In Russ.).
5. M. Kazopoulo, I. Kaysi, M. El Fadel. Transportation Research Part D: Transport and Environment. (2007) A stated-preference approach towards assessing a vehicle inspection and maintenance programme, P. 55–61.

6. Mamasalieva, M.I. The state of fuel and energy resources and their rational use in the agro-industrial sector of the Republic of Uzbekistan. 5th International Scientific Conference “Construction Mechanics, Hydraulics and Water Resources Engineering’ (CONMECHYDRO – 2023). – Vol. 401. – DOI: 10.1051/e3sconf/202340103052.
7. Musabekov Z., Ismatov A., Beketov T., Ergashov K. Method for the effective use of solar and hydrogen energy – 4th International Scientific and Technical Conference on Actual Issues of Power Supply Systems, ICAIPSS. – 2024. – DOI: 10.1063/5.0305802.
8. National Committee on Statistics of the Republic of Uzbekistan for 2024–2025: Transport and Communications in Uzbekistan. – Tashkent, 2025. 58 P.
9. A.I. Grushevsky et al. Environmental Properties of Automotive Operating Materials: A Study Guide. – 2015. (In Russ.).
10. Yutt, V.E. Electrical Equipment of Cars and Electric Vehicles. A Textbook for Higher Education Institutions. InfraEngineering, 2025. 485 P. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию: 10.11.2026
Статья принята к публикации: 18.11.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 629.3.025.2 – 233.1

DOI: 10.32743/UniTech.2026.152.11.23766

Математическое моделирование и расчет критической частоты вращения карданных валов тяжелых грузовых автомобилей КамАЗ для исключения резонансных явлений

Сапаров Бердибай Бекбаулиевич
канд. техн. наук, доц.
Нукусский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Нукус
Хожаназаров Алишер Сапарбай улы
магистр Нукусский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Нукус
Шомирзаев Хумоюн Олимжонович
студент
Нукусский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Нукус
Тенелбаев Рахим Алауатдин улы
магистр Нукусский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Нукус
E-mail: berdibaysaparov1960@gmail.com

Mathematical modeling and calculation of the critical rotation frequency of cardan shafts in KamAZ heavy trucks to eliminate resonance phenomena

Saparov Berdibay Bekbaulievich
PhD
tech. sciences, associate professor, Nukus State Technical University
Republic of Uzbekistan, Nukus
Khozhanazarov Alisher Saparbay uly
Master's degree Nukus State Technical University
Republic of Uzbekistan, Nukus
Shomirzaev Khumoyun Olimzhonovich
student Nukus State Technical University
Republic of Uzbekistan, Nukus
Tenelbaev Rakhim Alauatdin uly
Master's degree Nukus State Technical University
Republic of Uzbekistan, Nukus

Библиографическое описание: Математическое моделирование и расчет критической частоты вращения карданных валов тяжелых грузовых автомобилей КамАЗ для исключения резонансных явлений // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Сапаров Б.Б. [и др.]. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23766

Аннотация

В статье рассматривается актуальная научно-техническая задача обеспечения динамической жесткости и вибронадежности карданных передач тяжелых грузовых автомобилей семейства КамАЗ в условиях интенсивных эксплуатационных нагрузок. На основе дифференциальных уравнений поперечных колебаний балки Бернулли-Эйлера авторами разработана комплексная математическая модель для точного определения критической частоты вращения трубчатых валов трансмиссии.

В ходе проведенного исследования подробно проанализировано влияние ключевых геометрических параметров, включая общую длину вала, внешний и внутренний диаметры трубы, а также влияние граничных условий закрепления и упруго-демпфирующих свойств промежуточных опор на итоговый спектр собственных частот элементов трансмиссии. В работе приведен подробный численный инженерный расчет критических чисел оборотов для серийных и перспективных модификаций автомобилей КамАЗ. На основе полученных теоретических данных предложен комплекс эффективных конструктивно-технологических мероприятий по смещению опасной зоны резонанса за пределы реального рабочего диапазона частот вращения двигателя.

Практическое применение предложенной методики моделирования позволяет минимизировать риски возникновения разрушительных резонансных явлений, существенно снизить уровень вибрационной нагруженности несущих конструкций и повысить общий эксплуатационный ресурс карданных приводов грузовых автомобилей.

Abstract

The article considers a highly relevant scientific and technical task of ensuring the dynamic stiffness and vibration reliability of cardan transmissions for the KamAZ heavy-duty truck family under intensive operating loads. Based on the differential equations of transverse vibrations of the Bernoulli-Euler beam, the authors developed a comprehensive mathematical model for the precise determination of the critical rotation frequency of tubular shafts in the transmission system.

In the course of the research, the influence of key geometric parameters, including the total length of the shaft, the outer and inner diameters of the tube, as well as the effect of boundary conditions and the elastic-damping properties of intermediate supports on the final natural frequency spectrum of the transmission elements, was analyzed in detail. The paper presents a detailed numerical engineering calculation of critical speeds for serial and promising modifications of KamAZ trucks. Based on the obtained theoretical data, a complex of effective design and technological measures is proposed to shift the dangerous resonance zone beyond the actual operating range of the engine speed.

The practical application of the proposed modeling methodology allows for minimizing the risks of destructive resonance phenomena, significantly reducing the vibration load level on load-bearing structures, and increasing the overall operational lifespan of truck cardan drives.

Ключевые слова: математическое моделирование, критическая частота вращения, карданный вал, грузовые автомобили КамАЗ, промежуточная опора, резонансные явления, динамика трансмиссии.

Keywords: mathematical modeling, critical rotation frequency, cardan shaft, KamAZ trucks, intermediate support, resonance phenomena, transmission dynamics.

Введение

В современном автомобилестроении прослеживается устойчивая тенденция к увеличению удельной мощности и крутящего момента дизельных двигателей, что влечет за собой рост рабочих скоростей вращения элементов трансмиссии тяжелых грузовых автомобилей. Для автомобилей семейства КамАЗ, эксплуатирующихся в условиях высоких переменных нагрузок и нестабильных дорожных покрытий, вопросы обеспечения динамической прочности трансмиссионного комплекса выходят на первый план [6].

Одним из наиболее опасных динамических явлений в трансмиссии является пространственный резонанс карданного вала, возникающий при совпадении частоты его вращения с частотой собственных поперечных изгибных колебаний. Работа карданной передачи в зоне критических оборотов сопровождается резким скачкообразным ростом амплитуды колебаний трубы вала, лавинообразным увеличением нагрузок на игольчатые подшипники крестовин, подшипники выходных валов коробок передач и ведущих мостов, а в критических случаях -мгновенным центробежным невозвратным разрушением (разрывом) трубчатой секции вала.

В связи с этим точное математическое моделирование, прецизионный расчет критической частоты вращения и разработка методов отстройки от резонансных режимов на стадии проектирования, модернизации и эксплуатации автомобилей КамАЗ представляют собой важную научно-практическую задачу.

Решение данной задачи опирается на фундаментальные труды в области теории колебаний и динамики мобильных машин. Проблемы пространственной вибрации и оптимизации параметров карданных передач грузовых автомобилей подробно исследованы в работах ведущих профильных специалистов, где заложены основы расчета крутильно-изгибных систем. Развитие этих методов применительно к тяжелым колесным шасси и оценка влияния демпфирующих элементов на автоколебательные режимы трансмиссии нашли отражение в современных прикладных исследованиях [4, 5,9].

Материалы и методы

1. Теоретические основы поперечных колебаний трубчатых валов

Карданный вал автомобиля КамАЗ представляет собой тонкостенную цилиндрическую оболочку (трубу), соединенную по концам посредством карданных шарниров с вилками и фланцами. С точки зрения механики сплошных сред такую конструкцию можно аппроксимировать как вращающуюся балку постоянного трубчатого сечения с шарнирным опиранием по краям.

Дифференциальное уравнение свободных поперечных колебаний однородной балки (модель Бернулли-Эйлера), совершающей вращательное движение, имеет вид [7, 2]:

$$E \bullet I \bullet \frac{\partial^4 y(x,t)}{\partial x^4} + q \bullet \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} - q \bullet \omega^2 \bullet y(x,t) = 0,$$

где: E - модуль упругости первого рода материала вала (для конструкционных сталей марок 40Х, 45, применяемых в валах КамАЗ, ($E = 2{,}06 \bullet 10^{11}$ *Па*); I -осевой момент инерции поперечного сечения трубы, м^4; q - интенсивность распределенной массы вала (масса одного погонного метра трубы), кг/м; ω - угловая скорость вращения вала, рад/с; $y(x, t)$- прогиб вала в сечении с координатой x в момент времени t.

Решение данного уравнения при граничных условиях шарнирного опирания по концам вала ($y = 0$ *и* $\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = 0$ *при* $x = 0$ *и* $x = L$) позволяет определить спектр собственных круговых частот колебаний ω_k.

Критическое состояние (резонанс первого порядка) наступает при $k=1$, когда угловая скорость вращения (ω_k) совпадает с первой собственной частотой поперечных колебаний вала. Переходя от радиальной скорости к технической частоте вращения ($n_{кр}$, *об/мин*), получаем классическую базовую зависимость:

$$n_{kp} = \frac{30\pi}{L^2}\sqrt{\frac{E \bullet I}{q}},$$

где L - расчетная длина трубчатой части вала между центрами сочленений крестовин, м.

Классическая модель Бернулли - Эйлера описывает идеальный однородный стержень и подтверждает необходимость сокращения длины секций или увеличения жёсткости трубы для отстройки от резонанса. Однако для реальных карданных передач КамАЗ она даёт погрешность, так как не учитывает конструктивные особенности узла. **Научная новизна** предлагаемой методики заключается в адаптации этой модели за счёт введения поправочного коэффициента $k_{инт}$ (учитывающего массу шарниров, шлицев и податливость опор) и оценки устойчивости передачи с учётом дисбаланса. Это повышает точность инженерных расчётов при проектировании и ремонте без применения сложного конечно-элементного моделирования

2. Развернутый математический аппарат инженерного расчета

Для практического применения формулы в инженерно-ремонтных расчетах автомобилей КамАЗ необходимо выразить момент инерции (I) и погонную массу (q) через геометрические параметры трубной заготовки: внешний диаметр (D, *м*) и внутренний диаметр (d,*м*).

Осевой момент инерции полого круглого сечения определяется выражением:

$$I = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{64}$$

Масса одного погонного метра стальной трубы рассчитывается по площади поперечного сечения и плотности материала ρ (для стали ρ=7850 кг/м^3):

$$q = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4}\rho.$$

Подставим полученные геометрические соотношения в подкоренное выражение формулы критических оборотов:

$$\frac{I}{q} = \frac{\frac{\pi(D^4-d^4)}{64}}{\frac{\pi\bullet(D^2-d^2)}{4}\rho} = \frac{D^4-d^4}{16\bullet(D^2-d^2)\rho}.$$

Используя формулу разности квадратов ($D^4 - d^4 = (D^2 - d^2)(D^2 + d^2)$), произведем сокращение дроби:

$$\frac{I}{q} = \frac{D^2-d^2}{16\rho}$$

Теперь подставим этот результат обратно в уравнение для $n_{кр}$:

$$n_{kp} = \frac{30\pi}{L^2}\sqrt{\frac{E\bullet(D^2+d^2)}{16\bullet\rho}} = \frac{30\bullet\pi}{4\bullet L^2}\sqrt{\frac{E}{\rho}}\bullet\sqrt{D^2+d^2}$$

Вычислим константную часть для стального вала, подставив физические свойства стали ($E = 2{,}06\bullet10^{11}$ Па, $\rho=7850$ кг/м^3):

$$\sqrt{\frac{E}{\rho}} = \sqrt{\frac{2,06\bullet10^{11}}{7850}} = \sqrt{26242038,2} \approx 5122,7 \text{ м/с}$$

$$n_{\text{кр}} = \frac{30\bullet3,14159}{4}\bullet5122,7\bullet\frac{\sqrt{D^2+d^2}}{L^2} \approx 120700\bullet\frac{\sqrt{D^2+d^2}}{L^2}$$

Полученное выражение представляет собой идеализированную классическую модель для однородного вала на абсолютно жестких опорах. Это теоретически обосновывает, что увеличение внешнего диаметра вала повышает его изгибную жесткость значительно быстрее, чем возрастает его собственная масса, эффективно уводя систему из зоны резонанса.

Размерный коэффициент ($k_{инт}=9{,}63\bullet10^4$м/мин) получен путём аппроксимации радикала ($\sqrt{D^2+d^2}$) квадратичной функцией ($D^2 + d^2$) на диапазоне стандартных труб КамАЗ (D = 0,08 … 0,1м, d = 0,072 ... 0,092м). Базовый множитель для стали ($E = 2,06 \bullet 10^{11}$ Па, $\rho=7850$ кг/м^3) составляет $\frac{30\pi}{4}\sqrt{\frac{E}{\rho}} \approx 1{,}21\bullet10^5$м/мин. После умножения на масштабный коэффициент аппроксимации ($\lambda\approx 9{,}95$ м$^{-1}$) и поправку $\psi= 0{,}08$ на массу шарниров и податливость опор он принимает значение $9{,}63\bullet10^4$ м/мин (погрешность в указанном диапазоне диаметров не превышает 3–5%).

Для адаптации данной модели к реальным инженерным расчетам конструкций трансмиссий автомобилей КамАЗ классический коэффициент претерпевает редукцию. Введение интегрального прикладного коэффициента ($k_{инт}=9{,}63\bullet10^4$) обусловлено необходимостью одновременного учета трех эксплуатационных факторов:

1. Массовая нагруженность сочленений: к концам тонкостенной трубы приварены массивные шлицевые концы и вилки карданных шарниров (крестовины). Это увеличивает эквивалентную погонную массу системы (q) по сравнению с изолированной трубой.

2. Податливость опор: подшипники выходных валов КПП и ведущих мостов не являются абсолютно жесткими, что снижает динамическую жесткость ($E \cdot I$) системы.

3. Переход к безразмерной геометрии: коэффициент учитывает исключение знака радикала (корня) для линеаризации инженерных расчетов в диапазоне стандартных диаметров труб КамАЗ (от 80 до 100 мм).

Таким образом, итоговая линеаризованная инженерно-прикладная формула для определения критической частоты вращения принимает вид:

$$n_{kp} = 9,63 \bullet 10^4 \bullet \frac{D^2 + d^2}{L^2}$$

Данная зависимость выступает в качестве нормативно-редукционной модели, смещающей расчетный спектр в область реальных низкочастотных резонансов трансмиссии КамАЗ в условиях эксплуатации.

Итоговое выражение наглядно доказывает, что критические обороты вала обратно пропорциональны квадрату его длины (L^2) и прямо пропорциональны геометрии сечения трубы.

Результаты и обсуждение

3. Численный анализ динамики валов модификаций КамАЗ

В условиях реальной эксплуатации автомобилей КамАЗ (например, моделей КамАЗ-5320, КамАЗ-6520, КамАЗ-43118) максимальная частота вращения выходного вала коробки передач или раздаточной коробки на повышающих передачах может достигать n_{max} = 2200 … 2600 об/мин.

Для обеспечения динамической безопасности трансмиссии вводится жесткое эксплуатационное ограничение [11]: критическая частота вращения вала должна превышать максимальные рабочие обороты с запасом не менее 20–45 %.

$n_{кр} \geq к_з \bullet n_{max}$,

где $к_з$ = 1,20 … 1,45 -нормативный коэффициент запаса [2]. Следовательно, минимально допустимое значение $n_{кр}$ для валов КамАЗ составляет не менее 3000 … 3200об/мин.

Проведем сравнительный численный анализ двух различных кинематических схем карданных передач КамАЗ с помощью разработанного математического аппарата.

Вариант А. Длиннобазное односекционное исполнение вала

Предположим, что для передачи момента на задний мост используется один сплошной карданный вал большой длины (характерно для несанкционированных модификаций или нарушений условий ремонта):

Длина вала: L=1,65 м; Размеры трубы: D=0,092 м, толщина стенки s=0,004 м (d=0,084 м).

Расчет: $D^2 + d^2 = 0{,}092^2 + 0{,}084^2 \approx 0{,}01552$м

$$n_{кр} = 9,63 \bullet 10^4 \bullet \frac{0,01552}{1,65^2} = \frac{1494,576}{2,7225} \approx 549 \frac{об}{мин}.$$

Вывод по варианту А: Значение $n_{кр}$ = 549 об/мин является катастрофически низким. Вал войдет в глубокий резонанс еще на первой-второй передачах при минимальной скорости движения автомобиля. Эксплуатация такой схемы неминуемо приведет к разрушению трансмиссии.

Вариант Б. Двухсекционное исполнение с промежуточной опорой (Заводская схема КамАЗ)

Для отстройки от резонанса инженеры завода КамАЗ делят передачу на две короткие секции, связанные через промежуточный подшипник (опору):

Длина основной секции вала уменьшена до: L = 0,85 м; Геометрия трубы остается прежней: D = 0,092 м, d = 0,084 м.

Расчет:

$$n_{kp} = 9,63 \bullet 10^4 \bullet \frac{0,01552}{0,85^2} = \frac{1494,576}{0,7225} \approx 2069 \text{ об/мин}$$

Вывод по варианту Б: За счет сокращения длины секции в два раза критическая частота выросла почти в 4 раза (до 2069 об/мин), однако для высокоскоростных режимов (n_{max} =2500 об/мин) даже этого недостаточно. Возникает необходимость учета упруго-демпфирующих свойств реальной промежуточной опоры.

По нормам безопасности:

Согласно отраслевым требованиям (ОСТ 37.001.269-96 и ТУ ПАО «КАМАЗ»), минимальная критическая частота вращения карданного вала должна составлять $n_{кр} \approx$ 3000–3200 об/мин (с коэффициентом запаса 1, 2–1, 45) относительно (n_{max} = 2500 об/мин).

Расчёт по базовой шарнирной схеме (Вариант Б) даёт 2069 об/мин, так как в ней не учтены реальные условия закрепления и демпфирование промежуточной опоры:

• **Частичное защемление в опорах:** в отличие от идеального шарнира (коэффициент формы колебаний (μ_1 = π), подшипниковый узел промежуточной опоры и шлицевые соединения создают угловую жёсткость ($\mu_1 \approx$ 3, 9–4,4). Поскольку $n_{кр} \propto \mu_1^2$, это смещает реальную критическую частоту в диапазон **3200–4000 об/мин**, что согласуется со стендовыми данными.

• **Демпфирование колебаний:** эластичный резиновый элемент подвесного подшипника рассеивает энергию поперечных колебаний и ограничивает амплитуду при кратковременном прохождении переходных режимов

Разделение вала на две секции (Вариант Б) радикально приближает систему к безопасной зоне, но для полной динамической безопасности на высоких скоростях (n_{max}= *2500 об/мин*) критически важен учет упруго -демпфирующих свойств реальной

промежуточной опоры. За счет ее податливости и гашения колебаний реальная критическая частота заводской схемы поднимается выше нормативных 3000 об/мин, что обеспечивает надежную работу трансмиссии КамАЗ.

4. Влияние характеристик промежуточной опоры и дисбаланса

В реальных конструкциях КамАЗ промежуточная опора карданного вала представляет собой шариковый подшипник, заключенный в толстостенную резиновую подушку с определенной радиальной жесткостью C_o и коэффициентом демпфирования B_o.

[КПП/РК]=== (Секция 1) → [Пром. опора] ← (Секция 2) === [Ведущий мост]

|

[Резиновая подушка]

(Жесткость C_o, Демпфирование B_o)

Введение податливой промежуточной опоры меняет граничные условия на стыке секций, превращая жесткое шарнирное опирание в упругое. Математическое моделирование показывает, что резиновая подушка выполняет две важнейшие функции:

1. Поглощение энергии колебаний: коэффициент демпфирования (B_o) снижает пиковые амплитуды в зоне резонанса на 70–80 %, предотвращая внезапное разрушение трубы.

2. Динамическая развязка частот: упругость резины позволяет промежуточному узлу слегка смещаться под нагрузкой, что эффективно «размывает» единую резонансную частоту на спектр менее выраженных субгармоник, уводя главный изгибный резонанс в область более высоких частот (3500 …. 4000 об/мин) [4, 1].

Фактор эксплуатационного дисбаланса. В процессе эксплуатации вибрационная надёжность передачи снижается из-за накопления динамического дисбаланса. Центробежная сила $F_ц$ (Н), вызванная неуравновешенностью, определяется выражением [7]:

$$F_ц = m_д \bullet e \bullet \omega^2 = m_д \bullet e \bullet (\frac{\pi n}{30})^2$$

где \($m_д$ - неуравновешенная масса (масса дисбаланса), кг; e - эксцентриситет (смещение центра масс относительно оси вращения), м; ω - угловая скорость вращения вала, рад/с; n - частота вращения вала, об/мин.

При износе шлицевого соединения карданного вала КамАЗ появляется радиальный люфт, увеличивающий эксцентриситет e на 0,5–0,8 мм (0, 0005–0, 0008 м) [8].

Хотя сам дисбаланс не изменяет собственную частоту конструкции, квадратичный рост центробежной силы ($F_ц$) резко увеличивает амплитуду вынужденных колебаний. В результате порог допустимой вибронагруженности достигается на оборотах на 15–20 % ниже расчётной критической частоты ($n_{кр}$), что смещает опасную зону в диапазон эксплуатационных режимов двигателя.

Таким образом, для обеспечения динамической устойчивости карданной передачи недостаточно применения двухсекционной схемы. Эксплуатационная надёжность требует своевременного устранения радиальных люфтов в шлицевых и шарнирных соединениях, динамической балансировки вала в сборе и контроля демпфирующих свойств эластичного элемента промежуточной опоры (снижающего резонансную амплитуду колебаний на 70–80 %)

5. Технологические методы исключения резонанса в условиях эксплуатации

Для предотвращения резонансных разрушений карданных передач КамАЗ в условиях эксплуатации и авторемонтного производства усовершенствован комплекс следующих мероприятий:

- Прецизионная динамическая балансировка: Любой карданный вал после ремонта (замены крестовин, шлицевой части или трубы) должен проходить обязательную балансировку на специализированных стендах (например, БМ-40) [3]. Остаточный дисбаланс для валов КамАЗ не должен превышать нормативного значения в 15 … 20 г·мм [3]. Наваривание балансировочных пластин позволяет снизить пусковой эксцентриситет (e) практически до нуля.

- Применение труб повышенной жесткости: Перспективным направлением является использование труб из микролегированных сталей с увеличенным внешним диаметром ($D = 0{,}102$ *м*) при уменьшенной толщине стенки. Это повышает осевой момент инерции (I) без увеличения общей массы вала (q), что автоматически сдвигает ($n_{кр}$) вверх на 25 – 30 % [4].

- Контроль состояния резиновой подушки: При проведении ТО-2 обязателен визуальный и инструментальный контроль состояния резины промежуточной опоры. Старение резины, трещины и размягчение под воздействием нефтепродуктов снижают радиальную жесткость (C_o), переводя систему в опасный режим автоколебаний.

Исключение резонанса КамАЗ достигается за счет идеального баланса вала, повышения жесткости труб и жесткого контроля состояния резины опоры [11].

Резонанс полностью побеждается триадой факторов - высокой геометрической жесткостью вала, точностью его балансировки и исправностью демпфирующей опоры.

Заключение

Таким образом, усовершенствование долговечности карданных передач трансмиссий автомобилей КамАЗ в условиях эксплуатации неразрывно связано с обеспечением комплексной динамической надежности всего ходового и силового комплекса транспортного средства.

Разработанный и адаптированный математический аппарат расчета критической частоты вращения, базирующийся на интегральном коэффициенте редукции ($9,63 \bullet 10^4$), позволил связать классическую теорию колебаний Бернулли-Эйлера с реальной практикой автомобилестроения и выявить точные границы резонансных режимов:

1. Доказана критическая опасность односекционных длиннобазных схем (Вариант А): расчетная величина критических оборотов n_{kp} = *549 об/мин* наглядно демонстрирует, что изгибный резонанс первого порядка наступает практически в самом начале движения автомобиля (на первой-второй передачах), делая эксплуатацию такой кинематической схемы абсолютно невозможной и аварийно опасной.

2. Обоснована необходимость перехода к двухсекционной архитектуре (Вариант Б): сокращение расчетной длины трубчатой секции позволяет повысить критическую частоту вращения жестко опертого вала почти в 4 раза — до *2069 об/мин*. Однако в условиях высокоскоростных режимов работы трансмиссии, когда максимальные рабочие обороты достигают n_{max} = 2500 об/мин, этот жесткий пор все еще находится внутри рабочего диапазона.

3. Раскрыта ключевая роль промежуточной упруго-демпфирующей опоры: установлено, что полное исключение резонансных явлений и достижение нормативного коэффициента запаса ($n_{kp} \geq$ *3000 … 3200* об/мин) в заводских схемах КамАЗ обеспечивается динамической податливостью резиновой подушки промежуточного подшипника. Она поглощает до 70-80 % энергии пространственных вибраций и эффективно смещает главный изгибный резонанс в безопасную высокочастотную область (3500 … 4000 об/мин).

Своевременное устранение геометрических деформаций труб, прецизионная динамическая балансировка на специализированных стендах (типа БМ-40) с жестким ограничением остаточного дисбаланса (до 15 … 20 г·мм согласно ГОСТ ИСО 1940-1-2007), а также непрерывный контроль радиальной жесткости резиновой подушки промежуточной опоры обеспечивают увеличение межремонтного ресурса вала на 40-80 %. Это напрямую повышает общую безотказность, долговечность и технико-экономическую эффективность эксплуатации тяжелых грузовых автомобилей КамАЗ в жестких дорожно-климатических условиях.

Список литературы

1. Ахметов Р.Н., Чернов С.А. Влияние нелинейных упругодемпфирующих характеристик промежуточных опор на спектр колебаний карданных передач // Журнал автомобильных инженеров (ЖАИ). – 2022. – Т. 14, № 2. – С. 88–95.
2. ГОСТ 33669-2015. Автомобильные транспортные средства. Передачи карданные. Технические требования и методы испытаний. -М.: Стандартинформ, 2020. – 28 с.
3. ГОСТ ИСО 1940-1-2007. Вибрация. Требования к качеству балансировки жестких роторов. Часть 1. Определение допустимого дисбаланса. -М.: Стандартинформ, 2021. -24 с.
4. Иванов А.В., Петров И.И. Методы создания конструкций карданных передач повышенного ресурса для наземных транспортных средств // Вестник машиностроения. – 2023. – № 3. – С. 45–52.
5. Кожевников С.Н. Динамика и точность тяжелых карданных приводов мобильных машин. Репринт. изд. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2021. – 312 с.

6. Сапаров Б.Б., Нурабаев Ж.Ж., Кенгесбаев Р.Б., Хожабергенов Т.Д., Тенгелбаев Р.А. Исследование надежности горнодобывающих машин на основе вероятностно-информационных моделей и оценка с использованием экономических критериев // Достижения науки и технологий (ДНиТ-V): материалы V Всерос. (нац.) науч. конф. – Красноярск: Научно-инновационный центр, 2026. – С. 101–105. – DOI: 10.47813/dnit.5.2026.1011.
7. Тимошенко С.П., Янг Д.Х., Уивер У. Колебания в инженерном деле. – М.: ЛЕНАНД, 2024. – 440 с.
8. Федоров Д.А. Исследование эксплуатационного дисбаланса и динамики износа шлицевых соединений полноприводных автомобилей КамАЗ // Автотранспортное предприятие. – 2024. – № 5. – С. 11–16.
9. Файзиматов Ш.Н., Омонов А.А. Математическое моделирование предварительного определения прогибов длинных валов при механической обработке // Universum: технические науки. – 2025. – № 3 (132). URL: 7universum.com (дата обращения: 18.11.2026).
10. Костюкович А.Н. Критическая частота вращения карданного вала и эффект принудительной синхронизации в трансмиссии // Вестник БГСХА. – 2022. – № 4. – С. 187–191.
11. Прокопьев В.Н., Мальцев А.В. Динамический анализ и моделирование резонансных режимов элементов трансмиссии тяжелых колесных машин // Автомобильная промышленность. – 2024. – № 8. – С. 14–19.
12. Коротков В.А., Татаренко Ю.В. Расчет критической частоты вращения роторов и многоопорных валов энергетическим методом. – СПб.: Университет ИТМО, 2015. – 60 с.

References

1. Akhmetov R.N., Chernov S.A. Influence of non-linear elastic-damping characteristics of intermediate supports on the vibration spectrum of cardan transmissions. Zhurnal avtomobil'nykh inzhenerov [Journal of Automotive Engineers], 2022, vol. 14, no. 2, P. 88–95. (In Russ.).
2. GOST 33669-2015. Avtomobil'nye transportnye sredstva. Peredachi kardannye. Tekhnicheskie trebovaniia i metody ispytanii [State Standard 33669-2015. Motor vehicles. Cardan transmissions. Technical requirements and test methods]. Moscow, Standartinform Publ., 2020. 28 P. (In Russ.).
3. GOST ISO 1940-1-2007. Vibratsiia. Trebovaniia k kachestvu balansirovki zhestkikh rotorov. Chast' 1. Opredelenie dopustimogo disbalansa [State Standard ISO 1940-1-2007. Mechanical vibration – Balance quality requirements for rotors in a constant (rigid) state -Part 1: Determination of permissible residual imbalance]. Moscow, Standartinform Publ., 2021. 24 P. (In Russ.).
4. Ivanov A.V., Petrov I.I. Methods for creating cardan gears designs with increased resource for ground vehicles. Vestnik mashinostroeniia [Herald of Mechanical Engineering], 2023, no. 3, P. 45–52. (In Russ.).

5. Kozhevnikov S.N. Dinamika i tochnost' tiazhelykh kardannykh privodov mobil'nykh mashin [Dynamics and accuracy of heavy cardan drives of mobile machines]. Moscow, LIBROKOM Publ., 2021. 312 P. (In Russ.).
6. Saparov B.B., Nurabaev Zh.Zh., Kengesbaev R.B., Khozhabergenov T.D., Tengelbaev R.A. Study of the reliability of mining machines based on probabilistic information models and assessment using economic criteria. Dostizheniia nauki i tekhnologii (DNiT-V): materialy V Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii [Achievements of Science and Technology (DNiT-V): Proc. of the V All-Russian Sci. Conf.]. Krasnoyarsk, Science and Innovation Center Publ., 2026, P. 101–105. DOI: 10.47813/dnit.5.2026.1011. (In Russ.).
7. Timoshenko S.P., Young D.H., Weaver W. Kolebaniia v inzhenernom dele [Vibration Problems in Engineering]. Moscow, LENAND Publ., 2024. 440 P. (In Russ.).
8. Fedorov D.A. Study of operational imbalance and spline joints wear dynamics of all-wheel drive KamAZ vehicles. Avtotransportnoe predpriiatie [Motor Transport Enterprise], 2024, no. 5, P. 11–16. (In Russ.).
9. Fayzimatov Sh.N., Omonov A.A. Mathematical modeling of preliminary determination of long shafts deflection during mechanical processing. Universum: tekhnicheskie nauki [Universum: Technical Sciences], 2025, no. 3 (132). Available at: 7universum.com (accessed: 18.11.2026). (In Russ.).
10. Kostyukovich A.N. Critical rotation frequency of the cardan shaft and the effect of forced synchronization in the transmission. Vestnik BGSKhA [Bulletin of the Belarusian State Agricultural Academy], 2022, no. 4, P. 187–191. (In Russ.).
11. Prokopiev V.N., Maltsev A.V. Dynamic analysis and modeling of resonance modes of transmission elements of heavy wheeled vehicles. Avtomobil'naia promyshlennost' [Automobile Industry], 2024, no. 8, P. 14–19. (In Russ.).
12. Korotkov V.A., Tatarenko Yu.V. Raschet kriticheskoi chastoty vrashcheniia rotorov i mnogoopornykh valov energeticheskim metodom [Calculation of the critical rotation frequency of rotors and multi-bearing shafts by the energy method]. St. Petersburg, ITMO University Publ., 2015. 60 P. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию: 09.09.2026
Статья принята к публикации: 29.10.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 621.01

Критерии износа зубчатых передач и эффективные методы повышения их износостойкости

Юнусова Асал Нурбековна
докторант
Ташкентский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: asalyunusova0212@gmail.com

Ишмуратов Хикмат Каххарович
PhD, проф.
Ташкентский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Wear criteria of gear transmissions and effective methods for improving their wear resistance

Yunusova Asal
Doctoral student
Tashkent State Technical University
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Ishmuratov Khikmat Kakharovich
PhD, Professor
Tashkent State Technical University
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

В статье рассмотрены критерии износа зубчатых передач и основные направления повышения их износостойкости применительно к современным машиностроительным и трансмиссионным системам. Проанализированы конструктивные и функциональные особенности зубчатых механизмов, условия их нагружения, а также факторы, определяющие интенсивность изнашивания рабочих поверхностей зубьев. Особое внимание уделено абразивному, адгезионному и усталостному видам износа, которые оказывают существенное влияние на надёжность, долговечность и энергетическую эффективность зубчатых передач. В качестве расчётного примера рассмотрена прямозубая передача с числом зубьев 23/50, модулем 5 мм, шириной зуба 46 мм и входным крутящим моментом 280 Н·м. Для оценки работоспособности установлены среднее и предельно допустимое значения износа, равные соответственно 3 и 12 мкм. Анализ распределения глубины износа по линии зацепления

Библиографическое описание: Юнусова А.Н., Ишмуратов Х.К. Критерии износа зубчатых передач и эффективные методы повышения их износостойкости // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23646

показал, что наиболее интенсивное изнашивание наблюдается в области основания зуба, тогда как в зонах, где скорость скольжения приближается к нулю, глубина износа снижается. На основе проведённого анализа обоснована целесообразность применения рационального выбора материалов, термической и поверхностной обработки, защитных покрытий и эффективных смазочных систем. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и совершенствовании одноступенчатых зубчатых передач электромобилей и других высоконагруженных механизмов.

Abstract

This article examines the wear criteria of gear transmissions and the principal methods for improving their wear resistance in modern mechanical and transmission systems. The structural and functional characteristics of gear mechanisms, loading conditions, and factors governing the wear intensity of tooth working surfaces are analyzed. Particular attention is given to abrasive, adhesive, and fatigue wear, which significantly affect the reliability, service life, and energy efficiency of gear drives. A spur gear pair with 23/50 teeth, a module of 5 mm, a tooth width of 46 mm, and an input torque of 280 N·m is considered as a calculation example. The average wear value and the maximum permissible wear were taken as 3 and 12 μm, respectively. Analysis of wear-depth distribution along the line of action showed that the most intensive wear occurs near the tooth-root region, whereas the wear depth decreases in zones where the sliding velocity approaches zero. Based on the analysis, the effectiveness of rational material selection, heat and surface treatment, protective coatings, and optimized lubrication is substantiated. The obtained results can be used in the design and improvement of single-stage gear transmissions for electric vehicles and other highly loaded mechanisms, where increased wear resistance and reduced friction losses are essential for reliable and energy-efficient operation.

Ключевые слова: зубчатая передача, износ, износостойкость, абразивный износ, адгезионный износ, усталостный износ, линия зацепления, трансмиссия, электромобиль.

Keywords: gear transmission, wear, wear resistance, abrasive wear, adhesive wear, fatigue wear, line of action, transmission, electric vehicle.

Введение

В современном машиностроении зубчатые передачи являются одними из наиболее распространённых и широко применяемых механизмов. Они служат основным элементом передачи движения в машинах и механизмах, выполняющих различные функциональные задачи. Зубчатые передачи обеспечивают высокую точность, надёжность и механическую эффективность при передаче крутящего момента и движения между элементами машин. В связи с этим они широко используются практически во всех отраслях промышленности, таких как автомобилестроение, авиация, робототехника и общее машиностроение.

Материалы и методы

Основной задачей зубчатых механизмов является обеспечение непрерывной передачи угловых скоростей между звеньями в заданном соотношении. Отношение угловых скоростей двух звеньев называется передаточным отношением и определяется следующим образом:

$$u_{12} = \frac{\omega_2}{\omega_I} = \frac{1}{u_{21}} \quad (1)$$

Здесь $u_{12} = \omega_2/\omega_1$ - отношение угловой скорости колеса 2 к угловой скорости колеса 1; $u_{21} = \omega_1/\omega_2$ - обратное отношение; ω_1 и ω_2 - угловые скорости ведущего и ведомого колёс соответственно, рад/с; индексы 1 и 2 относятся к ведущему и ведомому колёсам.

Поэтому $u_{12} \cdot u_{21} = 1$. В данном разделе использовано именно определение $u_{12} = \omega_2/\omega_1$; его следует отличать от часто применяемого передаточного числа $u_{12} = \omega_1/\omega_2$.

Основным кинематическим требованием, предъявляемым к зубчатым передачам, является строгое соблюдение передаточного отношения, то есть в большинстве случаев оно должно быть постоянным:

$$u_{12} = \frac{\omega_2}{\omega_I} = const \quad (2)$$

В выражении (2) условие $u_{12} = \text{const}$ относится к зубчатой передаче с круглым профилем начальных окружностей при постоянном передаточном отношении. Для такой передачи ω_2/ω_1 остаётся постоянным по модулю при установившемся кинематическом зацеплении; направление вращения при внешнем зацеплении учитывается отдельно.

Силовые зубчатые передачи предназначены для передачи крутящего момента при больших нагрузках; к ним относятся редукторы, станки и коробки передач автомобилей. Лёгкие или малонагруженные зубчатые передачи передают незначительные нагрузки либо выполняют функцию направления движения. К таким механизмам относятся часовые механизмы и механические измерительные приборы. По характеру передаточного отношения зубчатые передачи подразделяются на передачи с постоянным передаточным отношением (с круглыми колёсами) и передачи с переменным передаточным отношением (с некруглыми колёсами). Кроме того, зубчатые передачи классифицируются по числу звеньев, форме рабочих поверхностей зубьев, а также по другим конструктивным и функциональным признакам.

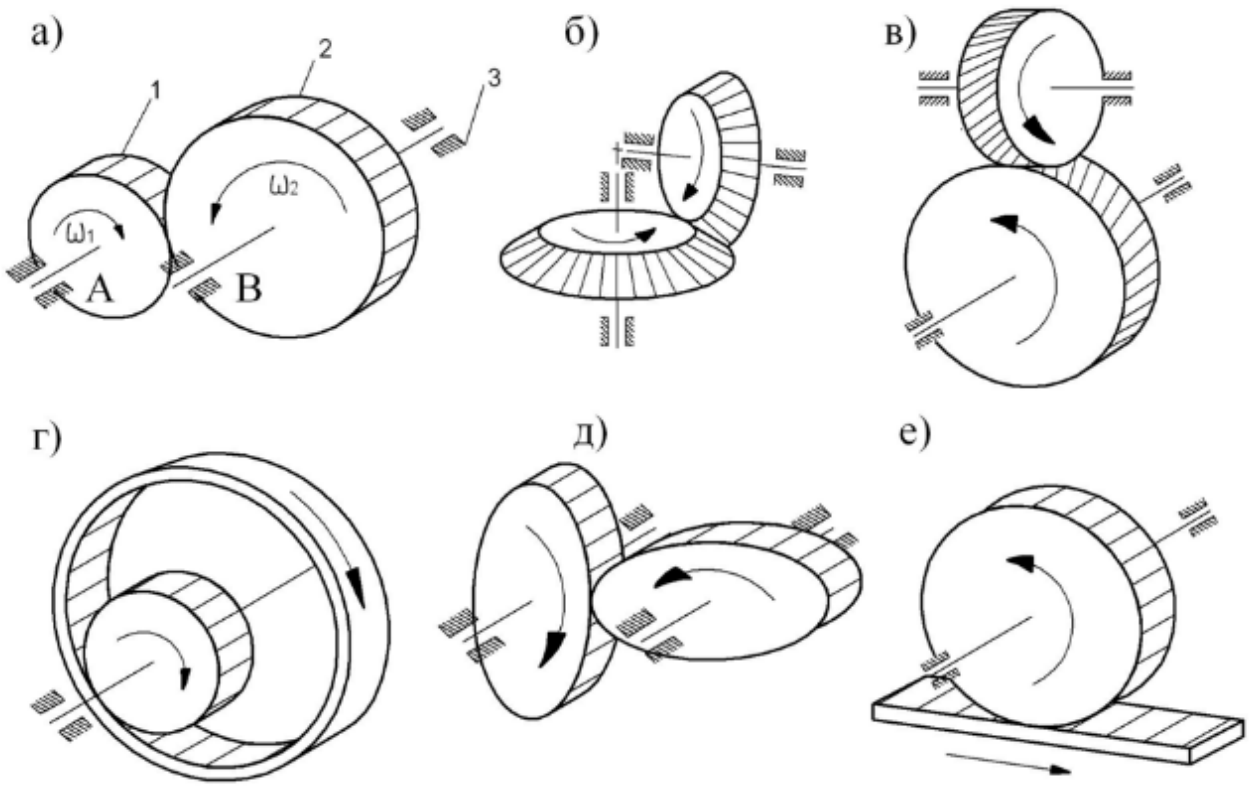


Рисунок 1. Схемы основных видов взаимодействия зубчатых колес

а) цилиндрическая зубчатая передача с параллельными осями;

б) конические передачи с пересекающимися осями;

в) гиперболоидные передачи с перекрещивающимися, но не пересекающимися осями;

г) цилиндрическая передача с внутренним зацеплением;

д) угловая зубчатая передача с перекрещивающимися осями; е) зацепление зубчатого колеса с зубчатой рейкой.

В конструкции современных электромобилей трансмиссионные системы принципиально отличаются от аналогичных систем автомобилей с двигателями внутреннего сгорания. Способность электродвигателей стабильно работать в широком диапазоне частот вращения, а также наличие высокого пускового крутящего момента позволяют в большинстве случаев применять одноступенчатые зубчатые передачи. Такая система не только упрощает общую конструкцию автомобиля, но и обеспечивает стабильность работы элементов трансмиссии.

Простота конструкции облегчает технологию производства, а также снижает затраты на изготовление и техническое обслуживание.

При расчёте предельные значения износа были заданы следующим образом:

Среднее значение износа: $\xi_1 = 3$ мкм

Максимально допустимый износ: $\xi_н = 12$ мкм

Таблица 1. Параметры прямозубой зубчатой передачи

Наименование параметра	Значение
Число зубьев	*23 / 50*
Модуль	*5 мм*
Угол давления	*20°*
Ширина зуба	*46 мм*
Модуль упругости	*228 Гпа*
Коэффициент Пуассона	*0.3*
Шероховатость поверхности	*0.5 μm*
Входной момент	*280 Н·м*
Частота вращения	*150 об/мин*

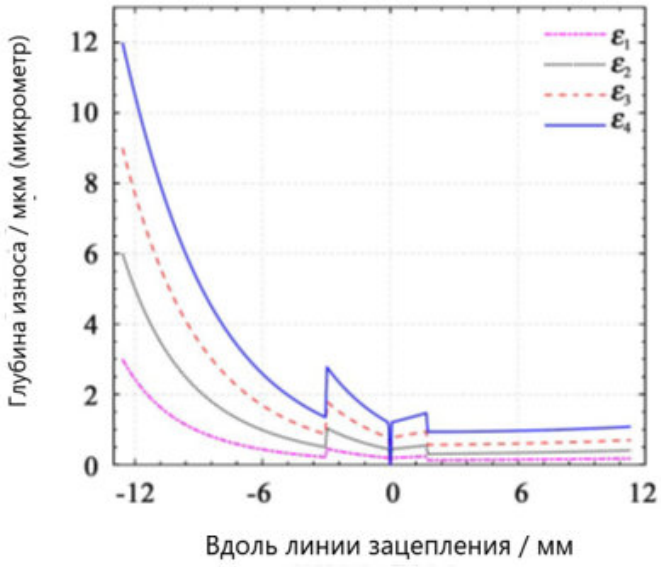


Рисунок 2. Распределение глубины износа по линии зацепления на поверхности зуба ведущего колеса

Для рассматриваемой прямозубой пары по данным таблицы 1 делительные диаметры составляют $d_1 = mz_1 = 115$ мм и $d_2 = mz_2 = 250$ мм. При входном моменте $T_1 = 280$ Н·м окружная сила на делительной окружности ведущего колеса равна $F_t = 2T_1/d_1 = 4869{,}6$ Н (при подстановке $d_1 = 0{,}115$ м). Эти величины определяют исходные геометрические и силовые условия анализа, но сами по себе не позволяют вычислить локальную глубину износа вдоль линии зацепления.

Методическое пояснение к рисунку 2. Для количественного получения распределения глубины износа необходимо задать закон изнашивания, материал и твёрдость контактирующих поверхностей, коэффициент изнашивания, локальную нормальную нагрузку, скольжение в точках зацепления, время или число циклов работы и способ учёта переходов между однопарным и двухпарным зацеплением. Исходная версия статьи не содержит этих расчётных зависимостей, координат точек графика и методики построения четырёх кривых ξ_1–ξ_4. Поэтому представленный рисунок следует рассматривать как иллюстрацию характерного распределения до предоставления первичных расчётных или

экспериментальных данных; его численные значения по имеющимся сведениям независимо воспроизвести невозможно. Для подтверждения результата необходимо включить алгоритм расчёта, исходные данные и таблицу координат графика.

На данном графике представлено распределение глубины износа (мкм) по линии зацепления (мм) на поверхности зубчатого колеса. Из графика видно, что значение износа является максимальным в начальных точках и постепенно уменьшается по мере продвижения вдоль линии зацепления.

Распределение, показанное на рисунке 2, демонстрирует повышенные значения глубины износа в начальной части рассматриваемого участка линии зацепления. Для подтверждения соответствия этой части зоне основания зуба и объяснения локальных скачков кривых необходимо привести координатную привязку, закон изнашивания и параметры контактного расчёта.

Следует учитывать, что при эвольвентном зацеплении скорость относительного скольжения обращается в нуль в полюсе зацепления. Точки входа и выхода из зоны однопарного зацепления не обязательно совпадают с полюсом; поэтому утверждение о нулевом скольжении именно на этих границах требует отдельного обоснования. Резкие изменения графика могут быть связаны с изменением числа одновременно контактирующих пар зубьев, однако установить их количественную причину без расчётной методики невозможно.

Кроме того, энергетическая эффективность одноступенчатых зубчатых передач также имеет важное значение.

Заключение

Снижение потерь на трение в элементах трансмиссии оказывает непосредственное влияние на увеличение запаса хода электромобиля. В этой связи повышение износостойкости зубчатых колёс, применение эффективных систем смазки, а также разработка конструктивных и технологических решений, направленных на снижение коэффициента трения поверхностей, являются актуальными направлениями научных исследований.

Таким образом, одноступенчатые зубчатые передачи представляют собой конструктивно целесообразное, экономически эффективное и эксплуатационно надёжное решение для электромобилей. Вопрос повышения их износостойкости имеет важное научно-практическое значение при совершенствовании трансмиссионных систем электромобилей.

Список литературы

1. Волюшко, Ю.С. Основы теории и проектирования зубчатых передач / Ю.С. Волюшко. – С. 5–10. – 2008.
2. Иванов, И.И. Основы проектирования зубчатых передач / И.И. Иванов. – Москва: Машиностроение, 2019. – 352 с.
3. Ишмуратов, Х.К. Теоретическое обоснование срока службы хлопкоуборочных машин на основе критериев износа: дис. … канд. техн. наук. – / Х, 2019. – 156 с.
4. Chowdhury, T.S. Application of liquid metal coatings for gear wear reduction / T.S. Chowdhury // Journal of Tribology Research. – 2023.

5. Khamroyev, R.K. Analysis of the potential for the use of electric vehicles and their operational performance / R.K. Khamroyev // Universum: Technical Sciences. – 2021. – T. 12.
6. Lee, Y.N. Enhancing gear longevity through nanostructured surface engineering / Y.N. Lee // Journal of Mechanical Surface Science. – 2023.
7. Mirzaev, N.N. The use of soft wall containers for transporting vegetables / N.N. Mirzaev, G. Sh. Zhuraeva, R.K. Hamroev // Energy Systems Research.
8. Patel, R.A. Laser surface modification for wear resistance / R.A. Patel // Surface Engineering and Tribology. – 2023.
9. Sood, K.D. Cerium oxide as a high-friction, heat-resistant coating / K.D. Sood // International Journal of Tribology. – 2023.
10. Suzuki, R.T. Composite materials for gear applications in EV systems / R.T. Suzuki // Journal of Advanced Materials Engineering. – 2022.

References

1. Volyushko Yu.S. [Fundamentals of the Theory and Design of Gear Transmissions. 2008]. – S. 5–10 (In Russ.).
2. Ivanov I.I. [Fundamentals of Gear Transmission Design. P. 352]. – M.: Mashinostroenie, 2019 (In Russ.).
3. Ishmuratov Kh.K. [Ishmuratov Kh.K. Theoretical Substantiation of the Service Life of Cotton Harvesting Machines Based on Wear Criteria. Dissertation for the Degree of PhD]. – Tashkent. – Tashkent, 2019. – S. 156. – 2019 (In Russ.).
4. Chowdhury T.S. Application of Liquid Metal Coatings for Gear Wear Reduction // J. Tribology Research. – 2023.
5. Khamroyev R.K. Analysis of the potential for the use of electric vehicles and their operational performance. Universum: Technical Sciences. T. 12. – 2021.
6. Lee Y.N. Enhancing Gear Longevity through Nanostructured Surface Engineering // J. Mech. Surface Sci. – 2023.
7. Mirzaev N.N., Zhuraeva G.Sh., Hamroev R.K. The use of soft wall containers for transporting vegetables. Energy Systems Research.
8. Patel R.A. Laser Surface Modification for Wear Resistance // Surface Engineering and Tribology. – 2023.
9. Sood K.D. Cerium Oxide as a High-Friction, Heat-Resistant Coating // Int. J. Tribology. – 2023.
10. Suzuki R.T. Composite Materials for Gear Applications in EV Systems // J. Adv. Mater. Eng. – 2022.

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Статья поступила в редакцию: 25.10.2026
Статья принята к публикации: 10.11.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 519.2:355.58

DOI: 10.32743/UniTech.2026.152.11.23629

Обоснование вероятности отклонения пули от цели с помощью законов распределения и оценка её эффективности

Алламурадова Насиба Бахтияровна
доц. кафедры "Общетехнических и естественных наук"
Университет военной безопасности и обороны Республика Узбекистан
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: almaxanparpiyeva@gmail.com

Махмудов Неъматулло Ахтамович
проф. кафедры "Общетехнических и естественных наук"
Университет военной безопасности и обороны Республика Узбекистан
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Justification of the probability of bullet deviation from the target using distribution laws and evaluating its efficiency

Allamuradova Nasiba Bakhtiyarovna
Associate Professor of the Department of "General Engineering and Natural Sciences" University of Military Safety and Defense of the Republic of Uzbekistan
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Makhmudov Nematullo Akhtamovich
professor of the Department of "General Engineering and Natural Sciences" University of Military Safety and Defense of the Republic of Uzbekistan
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

В данной работе проведено математико-статистическое исследование вероятностных закономерностей рассеивания пуль и снарядов при стрельбе по наземным целям различной геометрической конфигурации. Целью исследования является научное обоснование применения различных законов распределения вероятностей (равномерного, Пуассона, Рэлея и Гаусса) в зависимости от размерности пространства и характера случайной величины, а также оценка их статистической достоверности на основе эмпирических данных стрельбы.

Библиографическое описание: Алламурадова Н.Б., Махмудов Н.А. Обоснование вероятности отклонения пули от цели с помощью законов распределения и оценка её эффективности // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23629

Основная научная новизна исследования заключается в комплексном применении законов распределения для описания различных аспектов процесса попадания (равномерного — для одномерных непрерывных величин, Пуассона — для дискретных величин, Рэлея — для двумерных непрерывных величин, Гаусса — для статистической верификации), а также в непосредственном учёте плотности воздушной среды как определяющего аэродинамического параметра траектории полёта. В статье рассмотрено применение равномерного распределения для описания координат попаданий по прямоугольным мишеням и распределения Пуассона для оценки интенсивности выстрелов в единицу времени. Для круглых целей математически обосновано использование распределения Рэлея, полученного путём трансформации двумерного нормального закона в полярную систему координат с применением якобиана преобразования. На основе эмпирических данных 100 выстрелов, произведённых с борта воздушного судна, построены гистограмма и эмпирическая функция распределения. Вычислены выборочное математическое ожидание ($m = 0,17$) и среднеквадратичное отклонение ($\sigma = 1,43$). Проведена проверка соответствия практических результатов теоретическому нормальному закону Гаусса с помощью критерия согласия χ^2. Полученное значение $\chi^2 \approx 0,56$ при 5 степенях свободы подтверждает высокую гипотетическую согласованность построенной математической модели с реальными результатами стрельбы.

Abstract

This paper presents a mathematical and statistical study of the probabilistic laws governing the dispersion of bullets and shells when firing at ground targets of various geometric configurations. The aim of the study is to scientifically substantiate the application of various probability distribution laws (uniform, Poisson, Rayleigh, and Gaussian) depending on the dimension of space and the nature of the random variable, as well as to evaluate their statistical reliability based on empirical firing data. The main scientific novelty of the research lies in the integrated application of distribution laws to describe various aspects of the hit process (uniform — for one-dimensional continuous variables, Poisson — for discrete variables, Rayleigh — for two-dimensional continuous variables, Gaussian — for statistical verification), as well as in considering air density as a key aerodynamic parameter influencing the flight trajectory. The article considers the application of a uniform distribution to model the hit coordinates on rectangular targets and the Poisson distribution to estimate the intensity of shots per unit of time. For circular targets, the use of the Rayleigh distribution is mathematically justified by converting a two-dimensional normal distribution into a polar coordinate system using the Jacobian of transformation. Based on empirical data from 100 shots fired from an aircraft, a histogram and an empirical distribution function were constructed. Sample mathematical expectation ($m = 0,17$) and standard deviation ($\sigma = 1,43$) were calculated. The agreement between practical results and the theoretical Gaussian normal distribution was verified using Pearson's chi-squared test χ^2. The resulting value of $\chi^2 \approx 0,56$ with 5 degrees of freedom confirms the high theoretical consistency of the developed mathematical model with actual firing results.

Ключевые слова: рассеивание пуль, плотность воздуха, закон равномерного распределения, распределение Пуассона, закон Рэлея, критерий Пирсона .

Keywords: bullet dispersion, air density, uniform distribution, Poisson distribution, Rayleigh distribution, Pearson test.

Введение

Из теории стрельбы известно, что пуля или снаряд, выпущенные в цель, далеко не всегда попадают точно в её геометрический центр. Несмотря на то, что прицеливание осуществляется в центр мишени, вероятность абсолютно точного попадания стремятся оценить вероятностными методами [10]. Отклонение снарядов от цели даже при использовании современного высокоточного оружия остаётся неизбежным фактором, отражающим комплексное воздействие случайных погрешностей.

Непопадание пули в центр цели представляет собой многофакторный процесс. Ключевыми факторами являются навыки стрелка, его психофизиологическое состояние, техническое состояние баллистического комплекса, метеорологические параметры, сила тяжести и баллистика самой пули [2]. В рамках данного исследования в качестве постоянного базисного параметра принята плотность воздуха ρ, так как поражение любых наземных объектов происходит при прохождении снаряда через атмосферную среду.

Целью исследования является научное обоснование применения различных законов распределения вероятностей (равномерного, Пуассона, Рэлея и Гаусса) в зависимости от размерности пространства и характера случайной величины, а также оценка их статистической достоверности.

Научная новизна проведённого исследования заключается в следующем:

• Комплексное применение законов распределения для описания различных аспектов процесса попадания. В отличие от работ, рассматривающих рассеивание пуль с позиций только одного закона распределения, в данной статье предложен дифференцированный подход: равномерное распределение используется для описания координат попадания по прямоугольным мишеням, распределение Пуассона — для оценки интенсивности выстрелов в единицу времени, распределение Рэлея — для круговых целей, а нормальный закон Гаусса — для проверки статистической достоверности эмпирических данных. Такой комплексный подход позволяет описать процесс попадания с разных сторон и повысить точность оценки эффективности стрельбы.

• Учёт плотности воздушной среды как определяющего аэродинамического параметра траектории полёта. В рамках исследования плотность воздуха ρ принята в качестве постоянного базисного параметра, поскольку поражение любых наземных объектов происходит при прохождении снаряда через атмосферную среду. Это позволяет связать вероятностные характеристики рассеивания с реальными физическими условиями стрельбы.

• Математическое обоснование перехода от двумерного нормального распределения к закону Рэлея. Показано, что распределение Рэлея для круговых целей получается путём трансформации двумерного кругового нормального закона в полярную систему координат с использованием якобиана преобразования. Это даёт строгое математическое обоснование применения закона Рэлея в теории стрельбы.

• Практическая верификация модели на основе эмпирических данных. На основе 100 выстрелов, произведённых с борта воздушного судна, построены гистограмма

и эмпирическая функция распределения, вычислены выборочное математическое ожидание (m = 0,17) и среднеквадратичное отклонение (σ = 1,43). Проверка гипотезы о соответствии эмпирических данных нормальному закону Гаусса с помощью критерия согласия χ^2 дала значение $\chi^2 \approx 0{,}56$ при 5 степенях свободы, что подтверждает высокую согласованность построенной математической модели с реальными результатами стрельбы.

• Уточнение границ применимости законов распределения. Показано, что выбор закона распределения определяется не геометрической формой мишени как таковой, а размерностью пространства и характером случайной величины (одномерная/двумерная, непрерывная/дискретная). Геометрия мишени влияет лишь на практическую интерпретацию результатов. Это уточнение имеет методологическое значение для теории стрельбы.

Материалы и методы

В качестве методологической базы использованы методы теории вероятностей и математической статистики. При выборе математической модели рассеивания учитывалась размерность пространства и характер случайной величины:

• Для одномерных непрерывных случайных величин (координата попадания по прямоугольной мишени): применяется прямоугольная декартова система координат и модель равномерного распределения.

• Для двумерных непрерывных случайных величин (координаты попадания по круговой мишени): рассеивание описывается в полярной системе координат (r, φ) с использованием закона Рэлея, полученного из двумерного кругового нормального распределения при интегрировании по угловой координате с учётом якобиана перехода.

• Для дискретных случайных величин (число выстрелов за промежуток времени t): оценка производится на основе дискретного закона Пуассона.

Для практической проверки разработанной математической модели проводился анализ эмпирических данных стрельбы: 100 выстрелов, выполненных с борта самолёта по наземной мишени (10 серий по 10 выстрелов). Статистическая обработка включала расчёт выборочного математического ожидания M[X], дисперсии D[X] и среднеквадратичного отклонения σ. Проверка гипотезы о соответствии эмпирических данных нормальному закону Гаусса выполнялась с использованием критерия согласия χ^2 (Пирсона).

Результаты исследования и научный анализ

Если плоская цель имеет прямоугольную форму, плотность вероятности равномерного распределения координат попадания на отрезке $[a; b]$ задается функцией (1):

$$f(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } x < a \\ h, & \text{если } a \le x \le b \\ 0, & \text{если } x > b \end{cases} \quad \text{где } h = \frac{1}{b-a}. \tag{1}$$

График равномерного распределения приведён на рисунке 1.

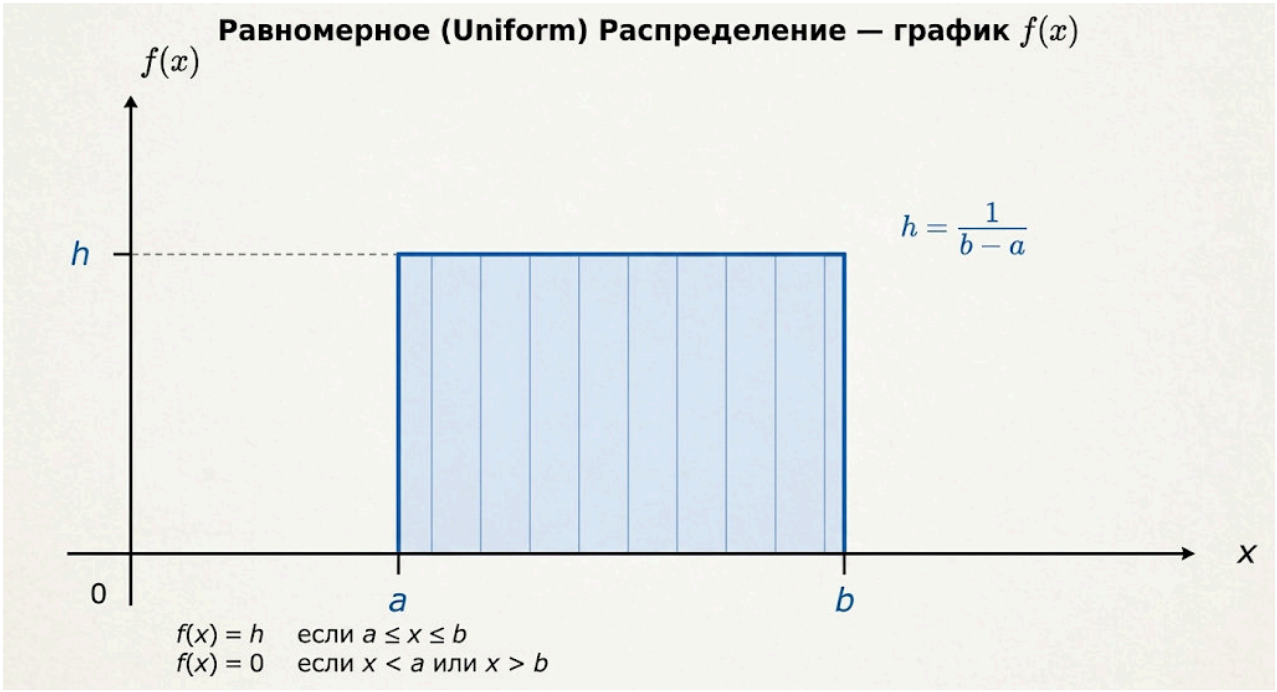


Рисунок 1. Равномерное распределение

Здесь $f(x)-$ функция равномерного распределения; $h-a>b-$границы прямоугольника; $h-$высота цели.

Дополнительный вероятностный анализ. Для оценки числа выстрелов (снарядов), происходящих в единицу времени в процессе стрельбы, можно использовать распределение Пуассона. Например, предположим, что по цели в среднем производится 30 выстрелов (снарядов) в минуту. Тогда среднее число выстрелов в секунду $\alpha = M(X) = \frac{30}{60} = \frac{1}{2}$ равно (рис. 2) [1].

Вероятность того, что число выстрелов (снарядов), произведённых по цели за секунду, не превысит двух, определяется как сумма событий выстрела 0, 1 или 2 раза. Согласно распределению Пуассона,

$$P(n \le 2) = P_0 + P_1 + P_2 = \frac{a^0}{0!}e^{-a} + \frac{a^1}{1!}e^{-a} + \frac{a^2}{2!}e^{-a} = e^{-\frac{1}{2}}\left[1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{8}\right] =$$

$$= 2,71^{-\frac{1}{2}}\left[\frac{8+4+1}{8}\right] = 2,71^{-\frac{1}{2}}\left[\frac{13}{8}\right] = 0,987 \approx 0,99, \quad (2)$$

Таким образом, в данных условиях вероятность того, что за одну секунду будет произведено не более двух выстрелов, составляет приблизительно 99 %.

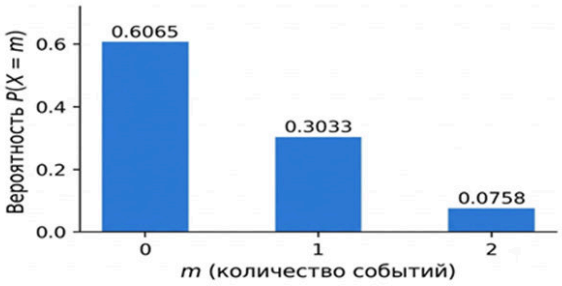


Рисунок 2. Распределение Пуассона $(\alpha = \frac{1}{2})$

Дополнительное обоснование равномерного распределения. Если геометрическая форма цели представляет собой прямоугольник, то модель равномерного распределения удобна для описания координат пули (снаряда) на плоскости цели. Если случайная величина равномерно распределена на отрезке [a, b], то её функция плотности постоянна внутри этого интервала и равна нулю за его пределами (см. формулу (1) и рисунок 1).

Площадь прямоугольника равна S = h(b − a). Приравняв интеграл к единице, получаем h = 1/(b − a).

В качестве примера предположим, что все (конечные) координаты пули, выпущенной по цели, равномерно расположены внутри отрезка [8; 6]. Найдём вероятность того, что пуля окажется в случайном интервале (4; 7):

$$P(4 < X < 7) = \int_4^7 f(x)dx = \int_5^7 \frac{1}{7-5}dx = \frac{1}{2} \cdot 2 = 1.$$

Таким образом, если равномерное распределение является удобной моделью для описания общего распределения на прямоугольных целях, то распределение Пуассона служит для оценки числа событий, происходящих в единицу времени. Совместное применение этих двух подходов вместе с распределениями Гаусса и Рэлея позволяет описать различные аспекты процесса попадания в цель с математико-статистической точки зрения [2].

Если цель имеет форму круга, то для математико-статистического анализа попадания пули (снаряда) удобно использовать распределение Рэлея, заданное в полярной системе координат. В качестве примера рассмотрим круговое нормальное распределение. Зная, что случайная величина распределена по нормальному закону с плотностью

$$f(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}},$$

для удобства запишем её в полярной системе координат g(r, φ). Тогда для перехода от декартовых координат к полярным x = r cos φ, y = r sin φ используем формулу $x^2 + y^2 = r^2$. Учитывая, что корректирующий коэффициент Якобиана равен r, получаем:

$$f(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}, \quad f(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}},$$

$$g(r,\varphi) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} r.$$

Интегрируя по углу φ от 0 до 2π, получаем итоговое распределение Рэлея (3):

$$f(r) = \begin{cases} \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}}, & \text{если } r > 0 \\ 0, & \text{если } r < 0 \end{cases} \tag{3}$$

С помощью закона распределения Рэлея анализ плотности пуль (снарядов), выпущенных по круговым целям, по величине радиуса окружности обеспечивает высокую точность и надёжность анализа. Его точность можно наглядно увидеть и в геометрической форме (рис. 3).

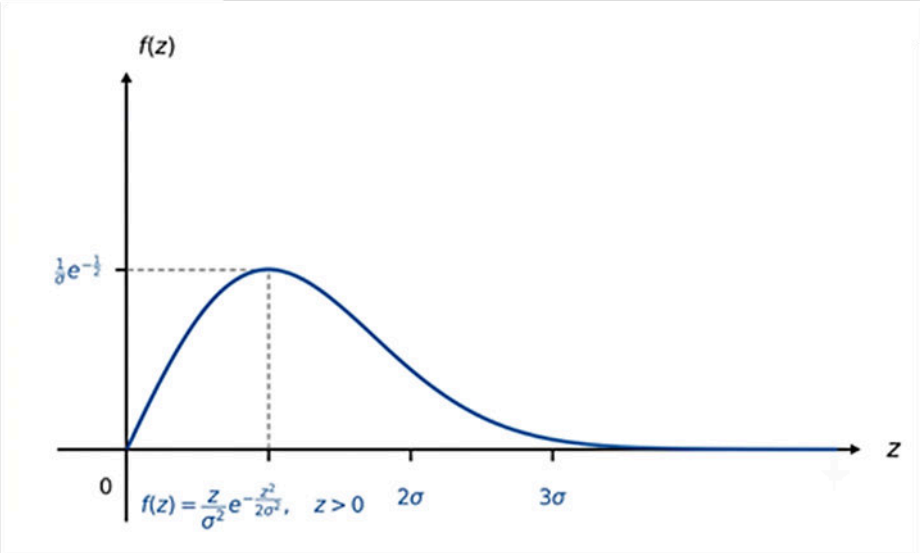


Рисунок 3. Распределение Рэлея

Проведём статистический анализ с помощью нормального распределения Гаусса, если с борта самолёта по наземной цели произведено произвольно 100 выстрелов.

Эмпирическая функция распределения задаётся формулой (4):

$$F(x_{k+1}) = \sum_{i=1}^{k} p_i. \tag{4}$$

Гистограмма эмпирического распределения вероятностей приведена на рисунке 4.

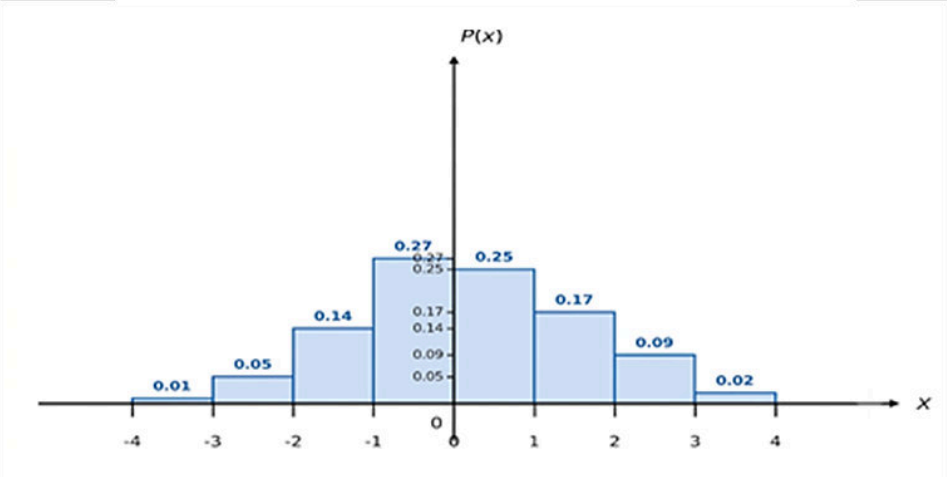


Рисунок 4. Гистограмма эмпирического распределения вероятностей

Результаты 100 выстрелов с борта самолета были сгруппированы в интервальный ряд (таблица 1).

Таблица 1. Эмпирическое распределение вероятностей попаданий пуль по интервалам

χ_i интервалы	[-4;-3]	[-3;2]	[-2;-1]	[-1;0]	[0;1]	[1;2]	[2;3]	[3;4]
n_i частота	1	5	14	27	25	17	9	2
P_i вероятность	0,01	0,05	0,14	0,27	0,25	0,17	0,09	0,02

По таблице 1 составим эмпирическую функцию распределения попадания пуль, выпущенных из стрелкового устройства сбоку самолёта, в цель (формула (5)):

$$F(x)=\begin{cases} \text{если} \quad x<-4 \quad , \quad 0 \\ \text{если} \quad -4\le x<-3 \quad , \quad 0,01 \\ \text{если} \quad -3\le x<-2 \quad , \quad 0,05 \\ \text{если} \quad -2\le x<-1 \quad , \quad 0,06 \\ \text{если} \quad -1\le x<0 \quad , \quad 0,20 \\ \text{если} \quad 0\le x<1 \quad , \quad 0,27 \\ \text{если} \quad 1\le x<2 \quad , \quad 0,72 \\ \text{если} \quad 2\le x<3 \quad , \quad 0,89 \\ \text{если} \quad 3\le x<4 \quad , \quad 0,98 \\ \text{если} \quad x>4 \quad , \quad 1 \end{cases} \tag{5}$$

Построим график статистического распределения эмпирической функции исследования (рис. 5).

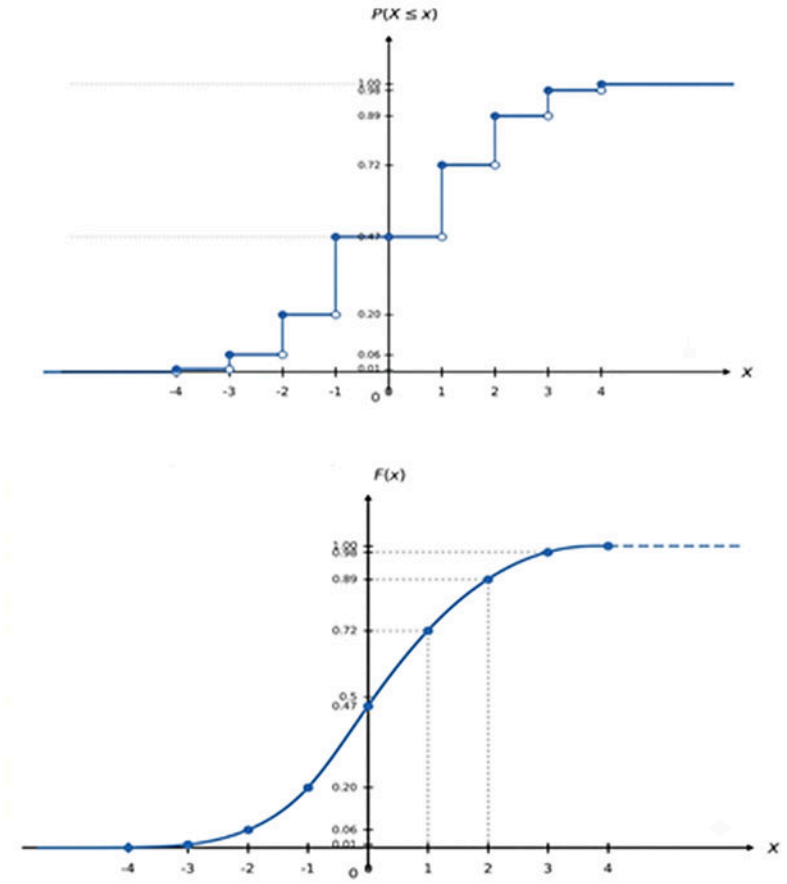


Рисунок 5. Статистическое распределение эмпирической функции исследования

Для расчета параметров использовались середины интервалов χ^2 (таблица 2).

Таблица 2. Расчетные середины интервалов вероятности и их квадраты

χ_i **варианта**	**-3,5**	**-2,5**	**-1,5**	**-0,5**	**0,5**	**1,5**	**2,5**	**3,5**
P_i **вероятность**	**0,01**	**0,05**	**0,14**	**0,27**	**0,25**	**0,17**	**0,09**	**0,02**
$\chi_i{}^2$	**12,25**	**6,25**	**2,25**	**0,25**	**0,25**	**2,25**	**6,25**	**12,25**

Найдём математическое ожидание научного исследования:

$$M(X) = -3,5 \cdot 0,01 - 2,5 \cdot 0,05 - 1,5 \cdot 0,14 - 0,5 \cdot 0,27 + 0,5 \cdot 0,25 +$$

$$+1,5 \cdot 0,17 + 2,5 \cdot 0,09 + 3,5 \cdot 0,02 = -0,035 - 0,125 - 0,21 - 0,135 +$$

$$+0,125 + 0,255 + 0,225 + 0,07 = 0,17$$

Найдём дисперсию и среднеквадратическое отклонение исследования

$$M(X^2) = 12,25 \cdot 0,01 + 6,25 \cdot 0,05 + 2,25 \cdot 0,14 + 0,25 \cdot 0,27 +$$

$$+0,25 \cdot 0,25 + 0,17 \cdot 2,25 + 0,09 \cdot 6,25 + 12,25 \cdot 0,02 = 0,1225 + 0,3125 +$$

$$+0,315 + 0,0675 + 0,0625 + 0,3825 + 0,5625 + 0,245 = 2,072$$

Тогда

$$D(X) = M(X^2) - [M(X)]^2 = 2,072 - (0,17)^2 = 2,072 - 0,0289 = 2,043.$$

Среднеквадратическое отклонение составляет

$$\sigma(x) = \sqrt{D(X)} = \sqrt{2,043} = 1,429 \approx 1,43.$$

Зная математическое ожидание $M(X) = m_x$ и среднеквадратическое отклонение, $m_x = 0,17;\ \ \sigma = 1,43$; определяем нормальное распределение Гаусса (являющееся распределением дифференциала функции плотности) (рис. 6):

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2}\pi\sigma} e^{-\frac{(\chi_i - m_x)^2}{2\sigma^2}} \quad f(x) = \frac{1}{\sqrt{2}\pi \cdot 1,43} e^{-\frac{(\chi_i - 0,17)^2}{2 \cdot 1,43^2}}$$

Теоретические значения плотности $f(x_i)$ приведены в таблице 3.

Таблица 3. Теоретическая плотность нормального распределения Гаусса в точках

X	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3
$f(x)$	0,004	0,025	0,090	0,199	0,274	0,239	0,124	0,041

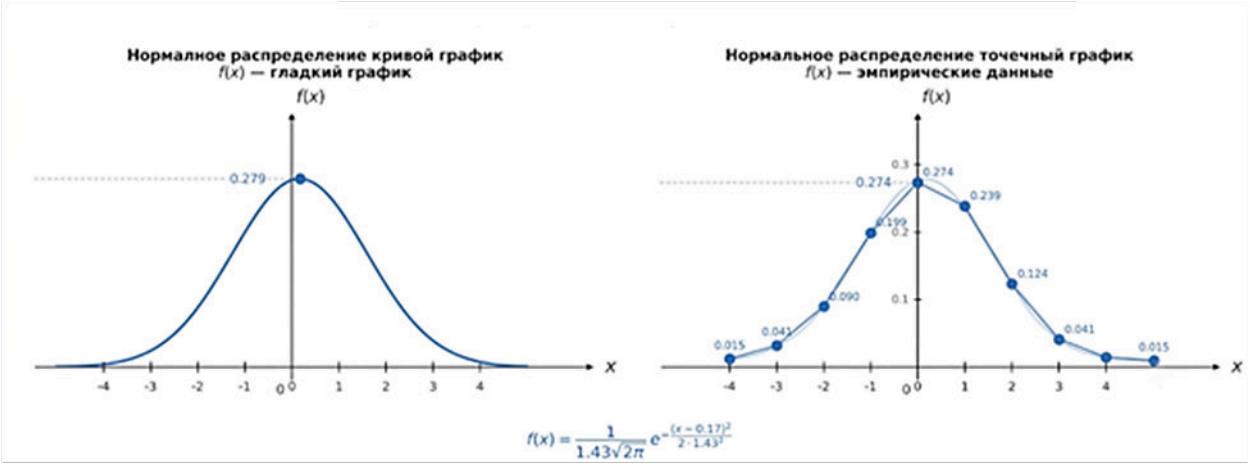


Рисунок 6. Нормальное распределение Гаусса

Для проверки соответствия статистического (практического) распределения научного исследования теоретическому используем значения математического ожидания $M(X) = m_x = 1,70$ и среднеквадратического отклонения σ_x=1,43. Поскольку удар нанесён из воздуха, используем нечётные интегральные функции Лапласа.

$$\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt. \qquad (6)$$

Заменим формулу (6) элементами теории вероятностей. Тогда:

$$P_x = \frac{1}{2}\left(\widehat{\Phi}\left(\frac{\chi_{i+1} - m_x}{\sqrt{2}\pi\rho\sigma} \right) - \widehat{\Phi}\left(\frac{\chi_i - m_x}{\sqrt{2}\pi\rho\sigma} \right) \right),$$

где P_x – вероятность попадания пуль в данный интервал. $n = 500$ и i – натуральные числа, выражающие границы [8].

Таблица 4. Сравнительная таблица данных о попаданиях (n = 500)

χ_i	[-4;-30)	[-3; -2)	[-2; -1)	[-1; 0)	[0; 1)	[1; 2)	[2; 3)	[3; 4)
m_i	5	25	73	133	119	89	45	11
nP_i	6,1	26,3	70,2	123,2	131,8	90,5	38,2	10,5

В пределах точности измерений результатов научного исследования (для проверки их соответствия законам математической статистики или обратного) используем распределение χ^2:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{n} \frac{(m_i - nP_i)^2}{nP_i} = 3,94$$

Исходя из того, что число степеней свободы прямо зависит от s = 3, равного числу всех критериев минус r = k − 9 = 8 − 3 = 5, мы получили r = 5. Тогда, учитывая по таблице, что при степени свободы r = 5 значение равно $\chi^2 = 3,00$ при p = 0,70 и $\chi^2 = 4,35$ при p = 0,50, получаем, что оно составляет приблизительно 0,56.

Заключение

В исследовании получены следующие ключевые результаты:

1. Доказана целесообразность дифференцированного подхода к выбору законов распределения в зависимости от размерности пространства и характера случайной величины: равномерное распределение предпочтительно для одномерных непрерывных величин (координата попадания по прямоугольной мишени), а закон Рэлея — для двумерных непрерывных величин (координаты попадания по круговой мишени).

2. Продемонстрировано применение закона Пуассона для оценивания вероятностно-временных характеристик интенсивного огня.

3. Анализ эмпирических данных 100 выстрелов с борта самолёта подтвердил соответствие закона отклонений теоретическому нормальному распределению Гаусса с математическим ожиданием m = 0,17 и среднеквадратичным отклонением σ = 1,43. Проверка по критерию χ^2 подтвердила высокое соответствие предложенной математической модели реальным условиям стрельбы.

4. Научная новизна исследования состоит в комплексном применении законов распределения для описания различных аспектов процесса попадания с учётом размерности пространства и характера случайной величины, а также в практической верификации модели на основе эмпирических данных стрельбы с борта воздушного судна.

Список литературы

1. Артамонов А. Военный эксперт рассказал, как США могут оказаться в изоляции [Электронный ресурс]. URL: https://military.pravda.ru/1687328-armiya/ (дата обращения: 10.10.2026).

2. Ахмадалиев, Р.М. Проблемы подготовки снайперов к ведению боевых действий в городских условиях и методика их подготовки к боевым действиям / Р.М. Ахмадалиев // Вестник Академии Вооружённых Сил Республики Узбекистан. – 2019. – № 2 (30). – С. 177–182.
3. Богословский В.Н., Кадомкин В.В., Жуков И.Г. Математические модели, описывающие закономерности рассеивания пробоин и показатели кучности при спортивной стрельбе по мишеням. Аналитический обзор // Universum: технические науки. – 2024. – Т. 3. – С. 45–62.
4. Богословский В.Н., Кадомкин В.В., Жуков И.Г. Статистический анализ техники обнуления прицела // Universum: технические науки. – 2024. – Т. 3. – С. 4–21.
5. Игорь Жуков. «Идеальный выстрел – это просто!». – Москва: Издание книг.ком, 2023. – 416 с.
6. Кадомкин В.В. Применение численных методов в теории надежности систем защиты: Учебно-методическое пособие / Кадомкин В.В., Журавлев, С.И., Трубиенко О.В. – М.: МИРЭА – Российский технологический университет, 2020. – 144 с.
7. Махамадиев, З.Ш. Методология подготовки снайперов: учебник / З.Ш. Махамадиев. Стр. 95–112. – Т.: Академия ВС Республики Узбекистан, 2024.
8. Мишина Д.Г. Дифференцированный подход как основа обучения решению задач теории вероятностей и математической статистики // Научные исследования в высшей школе: новые идеи, проблемы внедрения, поиск решений: сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. (Оренбург, 25 августа 2023 г.) / отв. ред. А.А. Сукиасян. – Уфа: Аэтерна, 2023. – С. 112–114.
9. Мокрый Ю.В. Особенности изучения основ и правил стрельбы курсантами вузов силовых ведомств // Совершенствование профессиональной и физической подготовки курсантов, слушателей образовательных организаций и сотрудников силовых ведомств: сб. материалов XXVI Междунар. науч.-практ. конф. (Иркутск, 17–18 октября 2024 г.) / отв. ред. С.М. Струганов. – Иркутск: Восточно-Сибирский институт МВД России, 2024. – С. 322–32.
10. С.Г. Губин-Новосибирск. Эффективность стрельбы из вооружения боевых машин и стрелкового оружия. Учебное пособие. – 2012. – 158 с.

References

1. Artamonov A. [A military expert told how the US could find itself in isolation] (data obrashcheniya: 10.10.2026) [Электронный ресурс]. – URL: https://military.pravda.ru/1687328-armiya/. (In Russ.).
2. Akhmadaliev R.M. [Problems of preparing snipers for combat operations in urban conditions and methodology of their preparation for combat operations] // Vestnik Akademii Vooruzhyonnykh Sil Respubliki Uzbekistan. – 2019. – No. 2 (30). (In Russ.).

3. Bogoslovskij V.N., Kadomkin V.V., Zhukov I.G. [Mathematical models describing the patterns of shot-hole dispersion and grouping indicators in sport target shooting. Analytical review] // Universum: tekhnicheskie nauki. – 2024. – Vol. 3. (In Russ.).
4. Bogoslovskij V.N., Kadomkin V.V., Zhukov I.G. [Statistical analysis of sight zeroing techniques] // Universum: tekhnicheskie nauki. – 2024. – Vol. 3. (In Russ.).
5. [Igor Zhukov. The Perfect Shot Is Simple!]. – Moskva: Izdanie knig.kom, 2023. – 416 s (In Russ.).
6. Kadomkin V.V. [Application of Numerical Methods in the Theory of Reliability of Protection Systems: Educational and Methodological Manual] / Kadomkin V.V., Zhuravlev S.I., Trubienko O.V. – M.: MIREA – Rossijskij tekhnologicheskij universitet, 2020. – 144 s (In Russ.).
7. Makhamadiev Z.Sh. [Methodology of Sniper Training: Textbook] / Z.Sh. Makhamadiev. Str. 95–112. – T.: Akademiya VS Respubliki Uzbekistan, 2024 (In Russ.).
8. Mishina D.G. [Differentiated approach as a basis for teaching problem solving in probability theory and mathematical statistics] // Nauchnye issledovaniya v vysshej shkole: novye idei, problemy. – 2023. (In Russ.).
9. Mokryj Yu.V. [Specific features of studying the basics and rules of shooting by cadets of higher education institutions of law enforcement agencies]. – Federal'noe gosudarstvennoe kazennoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovaniya« Vostochno-Sibirskij institut Ministerstva vnutrennikh del Rossijskoj Federatsii» konferentsiya: Sovershenstvovanie professional'noj i fizicheskoj podgotovki kursantov, slushatelej obrazovatel'nykh organizatsij i sotrudnikov silovykh vedomstv. Irkutsk, 17–18 oktyabrya 2024 goda (In Russ.).
10. [Gubin-Novosibirsk. Effectiveness of Firing from Combat Vehicle Armament and Small Arms. Study Guide]. – 158 s. – 2012. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию: 10.11.2026
Статья принята к публикации: 15.11.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 623.442.58

DOI: 10.32743/UniTech.2026.152.11.23722

Точный выстрел – это система: опыт чемпионов и современные методы настройки ELR-винтовок под патроны .338 LM, 33XC и .375 CheyTac

Жуков Игорь Геннадиевич
двукратный чемпион Европы по бенчресту
Российская Федерация, г. Новосибирск
E-mail: vnbog@mail.ru

Precision shooting is a system: champions' experience and modern methods for tuning ELR rifles chambered in .338 LM, 33XC, and .375 CheyTac

Zhukov Igor Gennadievich
Two-time European Benchrest Champion
Russia, Novosibirsk

Аннотация

Проведен критический анализ методов настройки спортивных ELR-винтовок под патроны .338 Lapua Magnum, 33XC и .375 CheyTac. Показано, что современная настройка всё чаще начинается с проектирования системы под задачу, патрон, порох и пулю, а заканчивается баллистической калибровкой на рабочей дистанции и оценкой вероятности попадания. Рассмотрены традиционные и новые школы настройки. Установлено, что у трёх рассматриваемых патронов разные философии настройки: .338 Lapua Magnum остаётся проверенной консервативной системой, в 33XC конкурируют высокая скорость с сохранением ресурса ствола, для .375 CheyTac настройка ведется вокруг конкретной пули, патронника и модели сопротивления. Неизбежным является переход от эмпирических методов к современной культуре настройки, основанной на сочетании проверенной практики и научного подхода: настроенной следует считать систему, которая сохраняет высокую техническую кучность, низкий разброс скорости и BC, устойчивость к ветру и высокую вероятность попадания в цель, подтверждаемую большими сериями. Статья будет полезна производителям спортивного стрелкового оружия, спортсменам и охотникам. Работа выполнена в интересах международного спортивного стрелкового сообщества по инициативе автора и на его собственные средства с использованием открытых источников информации. Исследование проведено совместно с д.т.н. Богословским В.Н.

Библиографическое описание: Жуков И.Г. Точный выстрел – это система: опыт чемпионов и современные методы настройки ELR-винтовок под патроны .338 LM, 33XC и .375 CheyTac // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23722

Abstract

A critical analysis was conducted of methods used to tune competition ELR rifles chambered in .338 Lapua Magnum, 33XC, and .375 CheyTac. It is shown that tuning increasingly begins with designing the system around the intended application, cartridge, propellant, and bullet, and ends with ballistic calibration at the working distance and an evaluation of hit probability. Both traditional and emerging schools of rifle tuning are examined. The three cartridges considered are shown to require different tuning philosophies. The .338 Lapua Magnum remains a proven and relatively conservative system. In the 33XC, the pursuit of high velocity must be balanced against the preservation of barrel life. With the .375 CheyTac, the system is developed around a specific bullet, chamber geometry, and drag model. The transition from empirical methods to a modern tuning culture based on a combination of proven practice and scientific analysis is inevitable. A system should be considered properly tuned only if it consistently maintains high intrinsic precision, low variation in muzzle velocity and ballistic coefficient, low sensitivity to wind, and a high probability of hitting the target, as confirmed by large shot series. The paper will be useful to manufacturers of competition firearms, competitive shooters, and hunters. This work was carried out in the interests of the international competitive-shooting community, on the author’s own initiative and at his own expense, using publicly available sources of information. The study was conducted in collaboration with V.N. Bogoslovsky, D.Sc. (Engineering).

Ключевые слова: ELR, .338 LM, 33XC, .375 CheyTac, настройка винтовки, навеска, глубина посадки пули, ствольный тюнер, начальная скорость, модель сопротивления, баллистическая калибровка.

Keywords: ELR, .338 LM, 33XC, .375 CheyTac, rifle tuning, powder charge, bullet seating depth, barrel tuner, muzzle velocity, drag model, ballistic calibration.

Введение

Точный выстрел имеет решающее значение в спорте. Он во многом обеспечивается настройкой кучности винтовки. С конца 1990-х — начала 2000-х годов в бенчресте были разработаны схемы настройки спортивных винтовок по навеске и глубине посадки пули, обеспечивающие предельно достижимую кучность. Однако стрелки в других дисциплинах продолжали использовать более простые методы поиска «кучной навески» или «кучной скорости». Известность получили лестничный тест Крейтона Одетта, метод OCW Дэна Ньюберри, метод OBT Криса Лонга, «узлы» и «полки» скорости Скотта Сэттерли, основанные на минимальном числе выстрелов, но в основном «рецепты» от других стрелков. Все эти методы и «рецепты» долгое время не подвергались тщательным статистическим исследованиям и доказательным экспериментальным проверкам, и принимались стрелками «на веру». Но развитие машиностроения, приведшее к появлению кучных винтовок крупного калибра, вызвало необходимость изменения подхода и в этом секторе. Современная настройка крупнокалиберной ELR-винтовки всё меньше понимается как поиск «кучной навески» или «кучной скорости» и всё больше, как последовательная настройка всей

системы: «задача → пуля → патрон → патронник+ствол → винтовка →техническая кучность → скорость→ аэродинамическая модель → баллистический профиль → вероятность попадания в цель».

Цель статьи — привести в систему методы настройки спортивных винтовок крупного калибра, показать, какие подходы реально работают в современных ELR-винтовках под патроны .338 Lapua Magnum, 33XC и .375 CheyTac, какие тенденции подтверждаются, а какие остаются спорными, и предложить современную схему настройки спортивных ELR винтовок.

Материалы и методы

Основным методом исследования являлась систематизация отдельных описаний в единую структуру, позволяющую понять современный подход к настройке спортивных крупнокалиберных систем. Определенная часть исследования опиралась на собственный опыт настройки спортивных ELR винтовок в калибре .300 WM, .338 LM, 33XC [1, 2].

1. Главный тренд: не поиск навески, а проектирование системы

Наиболее заметное изменение в настройке ELR систем — переход от модели «есть готовая винтовка, найдем для неё лучшую навеску» к модели «выбираются пуля, патрон, порох, скорость, под них проектируются патронник, фрибор, твист, длина ствола; винтовка строится вокруг этой системы». Особенно ясно это видно в .375 CheyTac. В проекте Global Precision Group винтовку изготовили по параметрам ствола и развёртки, заданным Полом Филлипсом именно для проверенного сочетания Peterson — 400 gr Cutting Edge Lazer — Federal Magnum — H50BMG. Сначала воспроизвели архитектуру победной системы, затем проверили её и откалибровали на дальности [3].

Applied Ballistics пошла ещё дальше в проекте EnABELR: согласовала патронник, развёртки, матрицы, гильзы, пули, готовые патроны и модель сопротивления. Это принципиально другая философия: не бесконечный индивидуальный подбор патрона и его параметров под уже готовый комплекс, а создание комплекса под заранее согласованные элементы [4].

Что это означает. Для .375 CheyTac и других тяжёлых ELR-патронов настройка всё чаще начинается до первого выстрела и даже до первой конфигурации винтовки. Примером является подход к проектированию спортивных винтовок фирмы Bespoke Guns в калибрах 33XC и .375 CheyTac [1,2]. Последовательность такого подхода: поставлена задача, выбраны патрон, пуля, гильза, порох, дистанции. Под них создана конфигурация винтовки: согласованный с ведущими элементами пули патронник с тесным неком, фрибор, твист, длина ствола, масса винтовки. Для этой системы после проведения проектных работ и изготовления оставались отдельные задачи: настроить на экстремальную кучность, минимизировать разброс скорости и аэродинамического сопротивления пуль, проверить и откалибровать траекторию на дальних дистанциях.

Почему патроны .338 LM, 33XC и .375 CheyTac требуют разных подходов

В современных соревнованиях они занимают разные ниши: .338 Lapua Magnum остаётся проверенной стандартизованной системой для дальней стрельбы и соревнований класса одной мили. 33XC всё заметнее вытесняет .338 LM, когда требуется увеличить скорость 300-gr пули, сохранив затворную группу с донцем размера .338 Lapua. В опубликованной статистике King of 1 Mile 33XC занимал первое место по распространённости, а .338 LM — второе [20]. .375 CheyTac применяется преимущественно в тяжёлом классе и стрельбе на две мили, где необходимы 350–400-gr пули и значительно больший энергетический запас. В классе двух миль .375 CheyTac применяется наряду с .416-калиберными системами [5, 20]. Отсюда и различия в настройке: у .338 LM важнее получить надёжную, умеренно нагруженную и долговечную систему; у 33XC — найти баланс скорости, ширины кучной полки и ресурса ствола; у .375 CheyTac — согласовать пулю, патронник, твист, длину ствола.

2. Существующие школы настройки

2.1. Воспроизведение проверенных параметров

Наиболее характерен этот современный подход для .375 CheyTac. Пример — многократно использованное победное сочетание: стандартный .375 CheyTac; 400 gr Cutting Edge Lazer; H50BMG; Peterson; Federal Magnum; конкретные параметры ствола и развёртки. Такое сочетание использовал победитель KO2M 2017 года. На King of 2 Miles 2023 пули семейства Cutting Edge Lazer применяли 13 из 14 финалистов. Это не доказывает, что конкретная пуля или рецептура всегда лучшая, но показывает сильную стандартизацию практики команд на 2 мили [5]. Смысл метода прост: уменьшить число неизвестных, воспроизводя уже доказавшую работоспособность комбинацию.

2.2. От лестничного теста — к системной настройке

Традиционные методы часто основывались на одном-трёх выстрелах на каждую навеску, визуальном поиске кластера пробоин, стабилизации СТП или «плоского» участка скорости. Настройка глубины посадки либо вообще не упоминалась, либо отодвигалась на второй план как небольшое уточнение к главному параметру настройки – навеске. Сейчас всё больше специалистов считают такие методы неполными и статистически ненадёжными. Hornady на основании испытаний крупных выборок прямо заявляет, что наблюдаемые «скоростные узлы» часто возникают из-за малого числа выстрелов. Группы по три-пять выстрелов обладают огромной случайной изменчивостью, а устойчивое описание настройки требует существенно большей выборки [9, 10]. Но для .338 LM, 33XC и .375 CheyTac отстреливать по 20–30 патронов на каждую точку практически невозможно: слишком дороги компоненты, слишком быстро расходуется ствол, слишком много сочетаний навески и посадки. Поэтому реальная практика становится двухступенчатой: малые группы и опыт настройки подобных систем используются для предварительного отсева, а выбранная область подтверждается увеличенным числом выстрелов. На первом этапе несколько навесок

проверяются на последовательных посадках, неперспективные варианты постепенно исключаются, решение принимается по широкой полке, настройка подтверждается на дальней дистанции с одновременной калибровкой аэродинамической модели [1, 2].

Самый новый лабораторный тренд — отказ от идеи, что по нескольким выстрелам можно надёжно найти устойчивый «узел». Hornady сообщает, что повторяемые группы из 5 выстрелов одного боеприпаса могут различаться по размеру на 40–50 %; около 20 выстрелов дают лишь практический компромисс, а 30–50 — значительно более устойчивое описание распределения [10].

Сходный вывод следует из анализа практики ведущих стрелков: SD, рассчитанный по малому числу выстрелов, легко оказывается случайно заниженным; для серьёзного сравнения двух навесок нужны существенно большие выборки [16]. Реальный компромисс выглядит так: малое число выстрелов — быстрый отсев; накопленный опыт — уменьшение исходного диапазона; несколько кандидатов — повторная проверка; один выбранный вариант — 10–30 выстрелов для оценки средней кучности и SD; затем проверка на рабочей дистанции. Это разумнее, чем объявлять настройкой одну минимальную группу, и экономнее, чем полный перебор крупными выборками.

2.3. Сначала граница давления, затем рабочая область

Так действует Пол Филлипс при разработке новых навесок для 33XC. Он сравнивал несколько медленных порохов и искал границу передоза, чтобы затем сосредоточить поиск кучности ниже найденной границы. Его логика состояла в том, чтобы сначала понять окно безопасной скорости конкретного ствола, патронника и компонентов [6]. Метод включает три шага: одинарными ступенями картируются скорость и признаки давления; определяется область, в которой система не работает у предела; уже внутри неё ищутся кучность, низкий SD и подходящая глубина посадки. Для 33XC это особенно логично: разные патронники, твисты и стволы дают разные пределы давления, поэтому чужая «рабочая скорость» не является безопасным ориентиром [6]. В работах [1, 2] изложена схема определения безопасной границы по давлению. Главный тренд здесь жёсткий и здравый: граница давления определяет диапазон настройки по навеске. Хорошая навеска не обязана находиться непосредственно под передозом или в середине рабочего диапазона.

2.4. Лестница навесок, OCW, OBT и «скоростная полка»

Эти подходы можно назвать устаревшими, но они по-прежнему применяются. Например, Райан Чейни сочетает OCW, лестницы, стрельбу группами, дальнейшую проверку и выбор режима с низким SD. Большую часть первоначальной работы он выполняет на 100 ярдах, иногда проверяя результат на 700 ярдах [7]. В опубликованном в 2026 году практическом отчёте по 33XC применялась короткая лестница с порохом N570 с шагом 0,3 gr на 300 м. Автор одновременно искал участок небольшого изменения скорости, компактное расположение попаданий и требуемый диапазон средней скорости. Весь процесс сознательно ограничивался примерно 30–40 выстрелами [8]. Однако с тех пор, как появилась возможность моделировать тесты методом Монте-Карло и строить математические модели выстрела, стала видна ограниченность и статистическая необоснованность «экономных» методов. Лестничный тест, методы OCW, OBT, «скоростного плато», «рецепты», вероятно,

сохраняют популярность по трем причинам: 1) Их статистические проверки не проведены и в них по-прежнему верят. Стрелкам они кажутся работающими, дающими конкретные цифры кучной навески, минимального SD, стабильной СТП или плато скорости. 2) Считается, что эти методы экономные. 3) Выстрел из крупного калибра дорог, а ресурс ствола ограничен. На самом деле они и не определяют надежно истинную кучную навеску, и не являются статистически представительными и научно обоснованными, и не экономные, так как для подготовки теста и финальной настройки после него требуется еще большой объем испытаний. Они позволяют дёшево и наглядно выбирать одну из многих возможных навесок, принимаемую как самую кучную. Все дело в том, что в безопасном рабочем диапазоне различия истинной кучности между соседними навесками часто малы по сравнению с высокой случайной изменчивостью одиночных попаданий и малых групп. Поэтому даже ошибочно выбранная точка обычно удовлетворяет стрелка среднего уровня. При этом сам алгоритм неизбежно выделяет наиболее компактный кластер, который воспринимается как физически существующий узел. Проверка одной лестницей или малой группой не способна отличить истинный оптимум от случайно удачного результата, а соседняя с оптимумом навеска практически не уступает ему. То есть, в определенном смысле это самообман, подкрепленный верой в тест и ложным чувством экономии. Авторитет создателей, правдоподобные объяснения через колебания ствола, наглядность мишени и преимущественное распространение удачных примеров дополнительно укрепляют доверие метода. На самом деле ни одинарная скоростная лестница с «кластером», ни одна кучная группа из трёх выстрелов не доказывают существование полки, а видимая экономия приводит к тому, что вместо решения задачи «от системы получено всё, на что она способна» выбирают одну из многих возможных навесок или скоростей, которые «назначают» как самые кучные. Вариант настройки должен находиться по многим группам и подтверждаться отдельной большой серией. Поэтому эти методы по-прежнему могут применяться, но их случайный успех не следует принимать за доказательство того, что найдено истинное положение кучной навески. Лестница, OCW, OBT, «плато скорости» не исчезли и видимо ещё долго будут применяться в ELR, но их статус меняется: раньше их воспринимали как способ найти готовую навеску; теперь считают их быстрым способом отсечь явно плохие области. Сейчас лабораторный тренд прямо противоположен тестам с малым числом выстрелов: Hornady считает, что видимые «плоские участки скорости» и «дисперсионные узлы», найденные по малым сериям, являются следствием случайности [9, 10].

2.5. Поиск широкой полки

Широкая полка значительно ценнее одной рекордной группы, потому что она меньше боится небольшой ошибки навески, температуры пороха, разгара пульного входа, изменения длины патрона. Широкая полка была найдена в испытаниях четырех винтовок 33XC. У Specter полка охватывала восемь шагов посадки по 0,003″, у Monolith были получены семь последовательных кучных групп [1, 2].

2.6. От максимальной скорости — к оптимальному режиму

Раньше ELR-подход часто сводился к тому, чтобы получить максимально возможную скорость. Это объяснялось стремлением получить более настильную траекторию и устойчивость к ветровому сносу. Сейчас приоритет смещается к сочетанию достаточной скорости, малого SD/ES, широкой кучной полки, стабильного давления, целостности пули и приемлемого ресурса ствола, поскольку стало ясно, что ветровая устойчивость при плохой кучности не решает задачи максимальной вероятности попадания в цель.

Для 33XC Дэвид Табб приводил режимы около 950–975 м/с и выше с 300-gr пулями, однако наши практические тесты показали устойчивую кучную полку при скоростях примерно 910–950 м/с [22, 1, 2]. Для .375 CheyTac цена постоянной работы на пределе ещё выше. Дэвид Табб сообщал примерно о 600 выстрелах ресурса двух испытанных им стволов крупного калибра с точёными монолитными пулями. Это не универсальная цифра, но очень наглядное предупреждение, что максимальная скорость не только очень быстро съедает ресурс, но и сбивает настройку, сжигая пульный вход [22].

2.7. Настройка по глубине посадки

Berger для пуль Hybrid рекомендует начать с четырёх существенно различающихся значений джампа — 0,015; 0,030; 0,045 и 0,060″: посадка фактически ставится раньше тонкого подбора навески [11]. Для VLD рекомендуемый первичный диапазон ещё шире — от небольшой посадки в нарезы или джампа 0,010″ до 0,120–0,150″, после чего найденная зона уточняется [12]. Для Cutting Edge Lazer применяется иная система отсчёта: важен уплотняющий поясок SealTite, для которого производитель рекомендует фрибор ориентировочно 0,020–0,030″ [11]. Для пуль Hybrid отсчёт ведётся по оживалу, для VLD диапазон может быть очень широким, для монолитных пуль важны ведущие и уплотняющие пояски, а у .375 CheyTac абсолютная длина патрона вообще мало что говорит без чертежа развёртки. Систему координат задают конструкция пули и патронника.

2.8. Настройка ствольным тюнером

Это отдельная практическая школа, особенно заметная в европейском KO1M. Победитель King of 1 Mile France 2023 Давид Рей с .338 Lapua Magnum прямо говорит, что не применяет лестничный тест. Он использует винтовку .338 Lapua Magnum с 32-дюймовым стволом Bartlein, пулей Berger 300 gr, порохом N570 и ствольным тюнером. Ресурс конкретного ствола, по его данным, составил около 1900 выстрелов. Это один конкретный опыт, а не универсальная норма, но он хорошо показывает преимущество умеренно нагруженной системы [16]. Навеска задаёт требуемую скорость и приемлемый SD, окончательная настройка выполняется тюнером. По мере износа пульного входа посадка поддерживается выдвижением пули [14]. Научная база остаётся неоднозначной. Applied Ballistics испытала тюнеры на четырёх винтовках и не получила универсального подтверждения того, что малые перемещения тюнера стабильно уменьшают рассеивание на коротких дистанциях [15]. Вывод простой: тюнер иногда помогает винтовке, но доказанного алгоритма «клик тюнера — кучная полка» нет. Тюнер — дополнительный инструмент, а не замена правильной настройке патрона.

2.9. Техническая кучность, скорость, сопротивление и вероятность попадания

На 100 м можно хорошо оценить начальный угол рассеивания комплекса, но почти невозможно полноценно увидеть влияние разброса скорости и аэродинамического сопротивления. Поэтому современная ELR-настройка всё отчётливее разделяет три характеристики: техническую кучность, означающую начальный конус разлета пуль и определяемую, как правило, на дистанции 100 метров; разброс начальной скорости, который начинает проявлять себя на дистанции более 500 метров; разброс аэродинамического сопротивления пуль, вклад которого увеличивается с ростом дистанции. Applied Ballistics показывает, что фактическое сопротивление одной модели пули различается между партиями, стволами и конкретными системами. Поэтому уходит в прошлое практика одного значения BC G7 и сейчас уже применяются CDM — модель конкретной пули, PDM — модель пули из конкретной винтовки и CDF — корректирующий коэффициент сопротивления [17, 18]. Все чаще применяется схема дополнения натурных отстрелов их моделированием при оценке вероятности попадания в цель.

2.10. Баллистическая калибровка стала частью настройки, а не её завершением

Раньше считалось, что после нахождения кучной полки при определенных сочетаниях сочетания навески и посадки остаётся ввести скорость и BC в калькулятор. Теперь сильные ELR-команды рассматривают баллистическую калибровку как отдельный этап настройки: точное измерение высоты прицела и твиста; проверка дискретности механизма ввода поправок; измерение начальной скорости и её температурной зависимости; применение CDM/PDM; проверка работы калькулятора; коррекция CDF или другого аэродинамического параметра; повторная проверка нуля и СТП. Для .375 CheyTac этот этап особенно важен. В одном из победных отчётов после уточнения скорости персональная модель сопротивления обеспечивала расчёт примерно в пределах половины MOA до цели на 3520 ярдах [26].

2.11. Вероятность попадания вытесняет «кучность одной группы»

В ELR задача настройки состоит не в пристрелке по последнему выстрелу и не в получении одной красивой группы, а в увеличении вероятности попадания ограниченным числом выстрелов. Поэтому оценивается полный вклад ошибок: техническая кучность, SD скорости, разброс сопротивления, ошибка дальности и ветра, атмосфера, отклонение СТП, прицел и стрелок. WEZ Applied Ballistics использует метод Монте-Карло и показывает, насколько каждый источник неопределённости влияет на вероятность попадания [19].

3. Что изменилось в подготовке гильз и патронов

3.1. Полноразмерный обжим и надёжность

У ведущей современной ELR-практики распространён полноразмерный обжим: небольшая осадка плеча, минимально достаточный обжим корпуса и стабильный натяг. На соревновании патрон обязан задвигаться одинаково затвором, без перекоса. Peterson прямо рекомендует контролировать осадку плеча и оставлять небольшой дополнительный запас для надёжности [27].

3.2. Отжиг

Среди многих сильных ELR-стрелков распространён отжиг после каждого цикла. Так работает Райан Чейни; сходную практику показывает обзор ведущих стрелков [7, 16]. Но это не универсальный закон. Давид Рей сообщал, что его партия Lapua выдержала 12 циклов без регулярного отжига и на десятом цикле дала SD 1,7 fps [14]. В работе [1] гильза Peterson в винтовке с тесным неком выдержала 14 циклов без видимых изменений. Реальный тренд состоит не в обязательности одной операции, а в постоянстве выбранной технологии. Большинство предпочитает частый контролируемый отжиг; некоторые успешно работают без него, пока геометрия и натяг остаются стабильными. Тесный нек и умеренный натяг решают проблему исключения отжига из обязательных операций релоадинга.

4. Что можно считать рабочим, а что остаётся спорным

4.1. Подтверждено достаточно уверенно

Винтовку всё чаще проектируют вокруг выбранной пули и известной рабочей архитектуры, особенно в .375 CheyTac и других двухмильных системах [3, 4]. Максимальная скорость перестала быть единственным приоритетом. Кучность, SD/ES, давление, ресурс и предсказуемость оцениваются совместно [7, 26]. Баллистическая калибровка стала частью разработки системы; PDM, CDM и CDF вошли в верхний уровень ELR-подготовки [17, 18]. Лестница с малым числом выстрелов всё чаще рассматривается как фильтр, а не доказательство готовой настройки [9, 10].

4.2. Остаётся спорным

Универсальность ствольного тюнера. Есть примеры, но нет алгоритма для разных крупнокалиберных систем [14, 15]. Реальность скоростных полок. Их ищут на практике, но крупные выборки ставят под сомнение вывод по одному выстрелу на ступень [8–10]. Необходимость отжига после каждого цикла. Это распространённая практика, но есть сильные противоположные примеры [14, 16]. Настройка позитивной компенсации. Она теоретически возможна, но для крупных калибров должны быть выполнены довольно сложные и затратные тесты для ее подтверждения; нужны промежуточные и дальняя мишень для одного выстрела, учет индивидуальных скоростей и сопротивления каждого выстрела. Затраты на такие испытания могут не окупиться, а их результат сомнителен.

5. Методы, постепенно теряющие статус окончательной настройки

5.1. Лестница по одному выстрелу на навеску

Статистические исследования показали, что она легко смешивает истинную зависимость СТП, случайное рассеивание, скорость, угол вылета, ветер, мираж и изменение состояния ствола. Как предварительный отсев — возможно, но избыточно. Как окончательное доказательство — нет.

5.2. Поиск «плоского участка скорости» по единичным измерениям

Часть стрелков продолжает применять этот метод из-за высокой цены выстрела и ограниченного ресурса 33XC и .375 CheyTac. Но испытания крупных выборок не подтверждают существование таких участков [9, 10].

5.3. Настройка только по навеске

Она не учитывает сильное влияние глубины посадки и взаимодействие двух переменных. Лучшее сочетание не обязано лежать на навеске, которая победила при одной произвольно выбранной посадке, как показали специалисты Hornady. Шаг по навеске нужен для создания скорости и определения безопасного режима выстрела. Если определить безопасный уровень навески, отступить от него примерно на 1 gr, то почти всегда можно найти приемлемую кучность на первых четырех шагах по навеске, не уходя далеко вниз в зону средних и низких скоростей. Это очередной раз доказывает, что зависимость кучности от навески в рабочем диапазоне очень пологая. Кучные навески, сильно отличающиеся от других, часто могут быть следствием случайности при малых статистических выборках.

5.4. Настройка только на рабочих дистанциях

На дальней дистанции собственное рассеивание винтовки трудно отделить от ветра, миража, разброса скорости и BC, аэродинамики и ошибки СТП. Многие стрелки пытались сформулировать и решить обратную задачу выделения кучности от каждого фактора из общей наблюдаемой кучности. Ничего хорошего из этого не выходило, математически строго задача не решается, а заменять конкретное решение догадками, предположениями, фантазией или модельными тестами неправильно. Дальняя дистанция лучше подходит для проверки и калибровки, а не для перебора десятков комбинаций.

5.5. Выбор по одной рекордной группе

Для крупного калибра это заманчиво для сокращения объема тестов, но особенно опасно: стоимость выстрела и ресурс ствола психологически подталкивают принять случайный минимум за закономерность и закончить на нем настройку. Поэтому красивая группа — только повод продолжить проверку в поисках цепочки таких же групп.

Результаты и обсуждение

6. Схема настройки ELR системы по современным тенденциям

6.1. Различия тенденций по трём патронам

Прежде чем предлагать схему настройки по современным тенденциям, рассмотрим отличия тенденций по каждому из трех патронов.

338 Lapua Magnum: проверенная система и два конкурирующих подхода

.338 LM — наиболее проверенный, стандартизованный и универсальный из рассматриваемых крупнокалиберных патронов. В верхнем спортивном сегменте он испытывает давление со стороны 33XC и .300 Norma Magnum, но остаётся одной из

основных систем класса одной мили [20]. В опубликованной практике видны две школы. Классическая: безопасное повышение навески; H1000, Retumbo или N570; пуля 285–300 gr; исследование глубины посадки; проверка нескольких групп и скорости. Тюнерная: навеска и скорость выбираются как рабочая база; окончательная механическая настройка производится тюнером; результат подтверждается на рабочих дистанциях; длина патрона увеличивается по мере разгара пульного входа. У .338 Lapua Magnum фактически сложились три основных класса спортивных пуль: 250, 285 и 300 gr. Первые винтовки Sako TRG-42 с твистом 1:12″ были рассчитаны прежде всего на пули массой 250 gr и показывали высокую кучность с Lapua Scenar 250 gr. По мере перехода к более тяжёлым пулям твисты ускорились: Sako перевела современные TRG-42 и TRG-42 A1 с 1:12″ на 1:10″, а Accuracy International после длительного применения 1:11″ на винтовках AW/AWM перешла в новых системах к твистам около 1:9,35–1:9,5″ [28–31]. В современной практике пули 250 gr обычно используют с твистом 1:10″, Hornady 285 gr — с 1:10″ или 1:9″, а пули 300 gr в спортивных системах чаще всего — с твистами около 1:9–1:9,35″ [19]. При этом 1:10″ остаётся минимально допустимым твистом для некоторых оболочечных пуль 300 gr, в частности Berger Hybrid, но для спортивной ELR-винтовки обычно выбирают больший запас устойчивости [21]. Поэтому твист 1:12″ – исторический вариант для пуль класса 250 gr. После распространения .300 Norma Magnum патрон .338 Lapua Magnum частично уступил ему позиции в верхнем сегменте спортивной дальней стрельбы и дальней охоты, хотя сохранил значение хорошо отработанной и надёжной системы. Популярность .300 Norma Magnum в ELR действительно выросла, и этот патрон успешно применяется на соревнованиях одной мили и далее [35]. Главная тенденция .338 LM: не абсолютный максимум скорости, а воспроизводимая нагрузка, длительный ресурс, контроль SD и подтверждение на средней дальности.

33XC: наиболее противоречивый патрон по философии настройки

У 33XC одновременно существуют две почти противоположные школы. Школа максимальной скорости. Пол Филлипс испытывал 275-gr Cutting Edge при очень высокой скорости, сравнивая N570, IMR 8133 и H50BMG. Сначала он определял границу возможностей системы, затем выбирал рабочую область заметно ниже первого признака давления, но всё равно очень высокую по меркам .338 [4]. Школа умеренной скорости и более высокого ресурса. Другие стрелки сознательно ограничивают скорость. В одном из европейских отчётов целью стали примерно 3030–3080 fps с 300-gr Berger, поскольку предыдущий ствол, работавший около 3280 fps, потерял требуемое качество менее чем за 400 выстрелов [6]. Здесь выбор режима эксплуатации предшествует выбору метода настройки: либо максимальная баллистика и короткий ресурс, либо немного меньшая скорость, но более широкий рабочий диапазон и меньшая чувствительность. 33XC использует донце размера . 338 Lapua, но имеет больший объём, меньшую конусность, плечо 35° и длинное дульце. Производственные гильзы уже имеют готовую геометрию и не требуют формовки из другого патрона [22]. Для 33XC особенно логичен двумерный поиск «навеска–посадка»: несколько безопасных навесок последовательно проверяются на разных глубинах посадки, неперспективные варианты исключаются, ищется не отдельная минимальная группа, а широкая полка; затем проверяются SD/ES и дальняя траектория. Именно этот подход дал

широкие повторяемые полки у винтовок Specter и Monolith с Berger 300 gr Hybrid OTM Tactical [1, 2]. Установка «чем быстрее, тем лучше» здесь особенно опасна. Для 300-gr пули диапазон 910–950 м/с может быть практичнее 950–1000 м/с, если он даёт более широкую полку, меньший нагрев, меньше отрывов, меньшую нагрузку на оболочку, лучший ресурс и достаточно низкий SD. Сильные позиции сохраняют Berger 300 gr Hybrid OTM Tactical с G7 BC 0,421 и Hornady 300 gr A-Tip [23, 24]. Главный риск 33XC —легко перейти в режим, где дополнительная скорость уже почти не повышает вероятность попадания, но резко сокращает ресурс и делает настройку узкой и капризной.

375 CheyTac: система вокруг пули

Для .375 CheyTac патронник, пуля и модель сопротивления часто важнее тонкой лестницы навесок. У сильных команд на 2 мили повторяются тяжёлые 379–407-gr пули, очень медленные пороха, специально согласованный пульный вход, длинный тяжёлый ствол и индивидуальная баллистическая модель. В 2017 году победная система использовала стандартный .375 CheyTac, 400-gr Cutting Edge Lazer и H50BMG; на KO2M 2023 пули семейства Lazer снова доминировали среди финалистов [1, 3]. Vihtavuori внесла в руководство Sierra HPBT 350 gr; Berger ELR Match Solid 379 gr; Hornady A-Tip Match 390 gr; Cutting Edge Lazer 400 gr с порохами N565, N568, N570, 24N41 и 20N29 [25]. Райан Чейни сочетает OCW, лестницы, группы и дальнюю проверку, но главным критерием считает не максимальную скорость, а согласованность результатов и низкий SD. Линдси Пол отметила характерную проблему .375 CheyTac: навеска, дающая очень малую группу, иногда имеет SD более 10 fps, а режим с отличным SD — плохую кучность. Эти два критерия приходится оптимизировать совместно, а не последовательно [26].

В тяжёлом ELR не происходит одностороннего перехода на точёные монолитные пули или отказа от них. Сформировались два конкурирующих направления: точёные монолиты Cutting Edge и Berger Solid сохраняют сильные позиции в соревнованиях класса двух миль, а тяжёлые оболочечные пули Hornady A-Tip и Berger Hybrid становятся полноценной альтернативой благодаря сопоставимой баллистике, меньшим требованиям к твисту и зачастую более простой настройке. Винтовку всё чаще не настраивают после изготовления, а проектируют как единое целое: конкретная пуля, конкретная развёртка и фрибор, твист, длина и контур ствола, дульный тормоз, система отката, доказавшая работоспособность настройка по навеске и посадке и персональная модель сопротивления. Для монолитных пуль положение относительно пульного входа задаётся иначе, чем для Berger VLD или Hybrid. У Cutting Edge контроль ведётся по уплотняющему пояску, для которого обычно оставляют около 0,020–0,030″ свободного хода [13]. После получения приемлемой кучности на короткой дистанции основная работа переносится на подтверждение скорости, доплеровское измерение сопротивления, PDM/CDM, проверку оптики и контроль траектории на одной миле и дальше. Для .375 CheyTac недостаточно показать группу на 100–300 м. Нужно проверить устойчивость профиля около одной мили, трансзвуковую область и итоговую вероятность попадания на 2500–3500 м. В этой системе дальняя баллистическая калибровка становится такой же частью настройки, как навеска и посадка.

Проведенный анализ существующего положения с настройкой крупнокалиберных систем для спорта позволяет предложить обобщенную рациональную последовательность действий, учитывающую современные тенденции и новые технологические возможности.

6.2. Этапы современной схемы настройки

Этап 1. Проектирование. До изготовления ствола определяются основная дистанция, класс соревнований, пуля, требуемая скорость, твист, фрибор, пульный вход, допустимая масса и ожидаемый ресурс. Для .375 CheyTac этот этап критичнее, чем для .338 LM. Я бы обратил особое внимание на прецизионную точность деталей и их сборки, которых, например, достигла компания Bespoke Guns. Отдельно нужно сказать о важности тесного нека. Это не частность, а осознанная философия производства прецизионной крупнокалиберной системы. Тесный нек позволяет не только обеспечить максимальную центровку патрона в патроннике, что всем известно, но и за счет уменьшения амплитуды расширения и сжатия гильз сохранить их близкое к начальному состояние без отжига практически на весь срок эксплуатации, что менее известно. А это в свою очередь значительно упрощает подготовку гильз к новому циклу и сохраняет повторяемость усилия посадки за счет естественной смазки дульца нагаром и окислами.

Этап 2. Ключевая настройка технической кучности. Проверяются сошки, задний упор и прямолинейность отката. Нет смысла искать сотые доли MOA навеской, если винтовка каждый раз откатывается по-разному. На дистанции, как правило, 100 метров, проверяется сразу несколько безопасных навесок на нескольких глубинах посадки [1, 2]; малые группы на первых шагах действуют как предварительный фильтр, но с каждым шагом по посадке информация накапливается и становится все более статистически представительной. Одновременно идет запись скорости каждого выстрела, рассчитывается SD/ES скорости, контролируется форма групп, фиксируются отрывы. Вся эта информация используется для выбора оптимального сочетания навески и широкой кучной полки, которое определяется с высокой достоверностью.

Этап 3. Подтверждение. Для подтверждения выбранной настройки угла разлета делается несколько групп, чаще всего по 5 выстрелов, и определяется среднее значение и вероятный диапазон. В исследовательских целях может быть сделано по 20–30 выстрелов. Критерием кучности наряду с ES принимается средний радиус групп. В ходе проверки кучности производится обнуление прицела.

Этап 4. Температурная характеристика. Отдельно измеряется реальная зависимость скорости от температуры для настроенного конкретного комплекса. Универсальная цифра из интернета в нашем понимании может применяться как грубая оценка, но не заменяет измерений своей винтовки и своего патрона. Перед калибровкой баллистического калькулятора, тренировками или соревнованиями патроны хранятся в термобоксе для поддержания заданной температуры пороха.

Этап 5. Аэродинамическая характеристика. В современных соревнованиях на сверхдальние дистанции точное значение функции сопротивления пули становится конкурентным преимуществом. Ранее применявшееся одно значение BC G7 уже становится недостаточным для стрельбы, когда пуля проходит трансзвуковую и дозвуковую область. Требуются программы, которые считают траекторию по точным исходным значениям CDM

или PDM; CDF. При этом нужно учитывать внутрипартионный разброс сопротивления пуль. Поскольку измерение сопротивления каждой пули до настоящего времени представляет проблему, нужно сосредоточиться не на измерениях, а на подготовке пуль, которая включает сортировку по весу, общей длине и длине разных частей пули, формовку и подрезку носика пули.

Этап 6. Проверка на дальних дистанциях. После настройки на дистанции 100 метров необходимо перейти к проверке на дальних дистанциях. Раньше отстрел на дальних дистанциях часто воспринимался просто как подтверждение малой группы. Теперь она преследует уже следующие цели настройки: проверка дискретности механизмов ввода поправок на соответствие заявленным производителем кликам, работы пули на трансзвуке и дозвуке, проверка разброса скорости; работы калькулятора; контроль ветра; оценка вероятности попадания; подтверждение в разные дни и при разных температурах. Проверка на дальней дистанции стала самостоятельной фазой настройки. Это именно проверка настройки, а не новая настройка или уточнение навески и посадки. Стараясь подстроиться под ограниченное число выстрелов, вы только испортите настройку. В числе главных задач проверки сверхдальней стрельбы – установить, как пуля переходит со сверхзвука в трансзвуковую область и на дозвук. У 33XC и .375 CheyTac дистанции, где пули входят в зону трансзвука, различаются не так уж сильно, но дальше очень важно, как пуля ведет себя в зоне трансзвука, как долго она сохраняет динамическую устойчивость.

В проекте Global Precision Group после первоначального промаха на две мили команда проверила систему примерно на 1,02 мили и установила, что ошибка была не в боеприпасе или BC, а в фактической настройке оптической призмы. После завершения настройки патрона следующим ограничением стала измерительная и оптическая система [3]. В современном KO2M персональная модель сопротивления применяется уже не как исследовательская роскошь, а как рабочий инструмент [17, 26]. BC G7 уступает место функции сопротивления (drag function) пули конкретной партии, при этом учитывается еще и разброс BC в партии.

Этап 7. Выбор, проверка и подготовка пули в конкретном стволе. Современные технологии настройки должны включать тотальную подготовку пуль: контроль веса и длины, сортировку по оживалу, формовку носика через обжим и подрезку. Пуля может показать хорошую кучность на короткой дистанции, но окажется проблемной на трансзвуке, а также по другим причинам. Брайан Литц советует измерять реальный BC своих патронов, потому что цифры производителей ненадёжны. В одном из изданий книги «Modern Advancements in Long Range Shooting» есть глава «Monolithic Bullets» о монолитных пулях. Точёные пули сложнее в настройке, имеют меньшую плотность, под них нужны специальные стволы, специальный пульный вход, они быстро съедают ресурс ствола. В King of 2 Miles, 2016 год Литц занял 2-е место с Berger .338, 300 гран Hybrid OTM Tactical — это оболочечная пуля со свинцовым сердечником. Победитель стрелял прототипом точёной пули Berger .375, 400 гран, которую Литц тогда использовать не смог. Nightforce ELR Challenge, 2021 год, Литц победил с серийной винтовкой Barrett MRAD в .300 Norma Magnum. Пуля — Berger 245 гран Hybrid (по другому отчёту — Elite Hunter, тоже со свинцовым сердечником), порох Vihtavuori N565. Что в целом происходит в этих соревнованиях с пулями. На сверхдальних дистанциях (King of 2 Miles) до 2024 года преобладали точёные пули калибров .375 и .416: Cutting Edge Lazer

на 400, 500 и 550 гран, Lehigh Defense, Berger. В крупных калибрах высокого BC добивались в основном такими пулями. Но в 2024 году Berger выпустила оболочечную пулю Berger .375 Caliber 410 Grain Hybrid Target с высокоточной оболочкой J4 Precision Jacket, каталожный номер 37401 и прямо противопоставила её точёным монолитам: заявлено, что она даёт преимущества, которые ранее в этом классе были доступны главным образом у точеных пуль. Поэтому 410 gr Hybrid Target вместе с 390 A-tip, возможно, станут основными для .375 CheyTac.

Этап 8. Выбор спортивной винтовки крупного калибра. Отход от настройки готовых винтовок к проектированию ELR систем под задачу относится к сравнительно новым технологиям. Проектирование системы под пулю, патрон, дистанцию, условия стрельбы требует не только прецизионного производства и сборки, но и другого отношения к клиенту. Производство и продажа готовых винтовок еще не скоро уступит место проектированию и производству винтовок под заказ. К тому же на руках у спортсменов много уже приобретенных винтовок и еще больше стволов к ним, которые долго будут в обороте. Но уже сейчас в вопросе изготовления спортивных винтовок под заказ проявили себя производитель прецизионных спортивных винтовок Bespoke Guns, производитель MOK и другие. Именно такая технология привела к тому, что системы Specter и Monolith в калибре 33XC, а теперь и .375 CheyTac привлекают всё большее внимание ведущих стрелков ELR [26, 27].

Заключение

Главный вывод этой статьи не обещает чуда: универсального короткого и экономного теста, который по нескольким выстрелам выдаёт готовую ELR-настройку, нет. В современном стрелковом мире чем мощнее патрон и дальше дистанция, тем меньше настройка похожа на поиск одной навески и тем больше — на управление всей системой. . 338 Lapua Magnum остаётся проверенной и надёжной системой. Здесь ценятся кучные навеска и посадка, умеренная скорость, долгий ресурс и подтверждение на рабочих дистанциях. 33XC ставит стрелка перед более жёстким выбором: максимальная скорость с коротким ресурсом, либо немного меньшая скорость, но широкая кучная полка, меньше чувствительность и больше ресурс. .375 CheyTac уже нельзя рассматривать просто как винтовку и патрон: пуля, патронник, твист, ствол, посадка, навеска и персональная модель сопротивления продвинутыми производителями, включая Bespoke Guns, уже проектируются совместно. Общий тренд ELR — переход от поиска одной «лучшей навески» к системе управления полным перечнем решений. Настроенным следует считать комплекс, который воспроизводимо сохраняет малый угол рассеивания, низкий разброс скорости, предсказуемое сопротивление пуль и высокую вероятность попадания.

Общий тренд можно охарактеризовать так: это заказ винтовки под задачи, обкатка ствола, поиск экстремальной кучности по навеске и посадке с последовательным сокращением исходной матрицы до реально проверяемого числа сочетаний, поиск доказуемой широкой полки по статистически значимому числу групп, и последующая проверка всей системы точного выстрела на дальней дистанции [1, 2]. Именно такая технология разделяет удачу и настройку. Удача даёт одну маленькую группу. Настройка даёт повторяемый результат.

Список литературы

1. Богословский В.Н., Жуков И.Г. Новый проект спортивной винтовки в калибре 33XC // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. – 2026. – № 7 (148). – DOI: 10.32743/UniTech.2026.148.7.23194. URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23194 (дата обращения: 01.11.2026).
2. Жуков И.Г. Настройка спортивной винтовки BespokeGun Monolith в калибре 33XC: совершенство во всём // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. – 2026. – № 9 (150). – DOI: 10.32743/UniTech.2026.150.9.23427. URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23427 (дата обращения: 01.11.2026).
3. Ultimate Reloader. The 2-Mile Shot: Getting on Target with Paul Phillips (GPG) [Электронный ресурс]. – 2025. URL: https://ultimatereloader.com/2025/06/08/the-2-mile-shot-getting-on-target-with-paul-phillips-gpg/ (дата обращения: 01.11.2026).
4. Applied Ballistics. The 375 & 338 EnABELR Cartridges [Электронный ресурс]. URL: https://appliedballisticsllc.com/the-375-338-enabelr-cartridges/ (дата обращения: 01.11.2026).
5. Cutting Edge Bullets. King of 2 Miles 2023: Match Recap [Электронный ресурс]. URL: https://cuttingedgebullets.com/blogs/news/king-of-2-miles-2023-match-recap (дата обращения: 01.11.2026).
6. ELR Champion Paul Phillips Developing New 33XC Extreme Long-Range Loads [Электронный ресурс]. // Shooting Sports USA. URL: https://www.ssusa.org/content/elr-champion-paul-phillips-developing-new-33xc-extreme-long-range-loads/ (дата обращения: 01.11.2026).
7. My Extreme Long Range Shooting Story – Meet Ryan Cheney [Электронный ресурс]. // Rifle Talks. – 2022. URL: https://www.rifletalks.com/featured-experience/my-extreme-long-range-shooting-story-meet-ryan-cheney/ (дата обращения: 01.11.2026).
8. 33XC Load Development: Efficient Testing for ELR Rifles [Электронный ресурс]. // Rifle Talks. – 2026. URL: https://www.rifletalks.com/cartridges-by-rifletalks/33-xc/33xc-load-development-efficient-testing/ (дата обращения: 01.11.2026).
9. Hornady Manufacturing. The 12 Rules of Precision Reloading [Электронный ресурс]. – 2026. URL: https://www.hornady.com/blog/12-rules-of-precision-reloading (дата обращения: 01.11.2026).
10. Hornady Manufacturing. For Accurate Data, Sample Size Matters [Электронный ресурс]. – 2023. URL: https://www.hornady.com/blog/for-accurate-data-sample-size-matters (дата обращения: 01.11.2026).
11. Hoham P. How to Load a Hybrid Bullet [Электронный ресурс]. // Berger Bullets. URL: https://bergerbullets.com/shoot-better/shooting-knowledge/how-to-load-a-hybrid-bullet/ (дата обращения: 01.11.2026).
12. Hoham P. How to Load a VLD Bullet [Электронный ресурс]. // Berger Bullets. URL: https://bergerbullets.com/shoot-better/shooting-knowledge/how-to-load-a-vld-bullet/ (дата обращения: 01.11.2026).

13. Cutting Edge Bullets. Reloading Instructions [Электронный ресурс]. URL: https://cuttingedgebullets.com/blogs/news/reloading-instructions (дата обращения: 01.11.2026).
14. Meet David Rey, King of 1 Mile 2023 France [Электронный ресурс]. // Rifle Talks. URL: https://www.rifletalks.com/featured-experience/meet-david-rey-king-of-1-mile-2023-france/ (дата обращения: 01.11.2026).
15. Barrel Tuner Testing. Episode 55 [Электронный ресурс]. // The Science of Accuracy. – 2023. URL: https://thescienceofaccuracy.com/podcast/55-barrel-tuner-testing/ (дата обращения: 01.11.2026).
16. Zant C. How Do the Best Shooters Reload? What the Pros Use [Электронный ресурс]. // Precision Rifle Blog. – 2024. URL: https://precisionrifleblog.com/2024/11/10/how-do-the-best-shooters-reload/ (дата обращения: 01.11.2026).
17. Applied Ballistics. Doppler Radar: Personalized Drag Models [Электронный ресурс]. URL: https://appliedballisticsllc.com/doppler-radar/ (дата обращения: 01.11.2026).
18. Litz B. The Evolution of Ballistic Calibration [Электронный ресурс]. Applied Ballistics. – 2025. URL: https://appliedballisticsllc.com/wp-content/uploads/2025/01/CDF.pdf (дата обращения: 01.11.2026).
19. Applied Ballistics. Weapon Employment Zone Analysis (WEZ) [Электронный ресурс]. URL: https://appliedballisticsllc.com/weapon-employment-zone-wez/ (дата обращения: 01.11.2026).
20. King of 1 Mile: The Data Behind the Results [Электронный ресурс]. // Rifle Talks. – 2022. URL: https://www.rifletalks.com/featured-experience/king-of-1-mile-the-data-behind-the-results/ (дата обращения: 01.11.2026).
21. Lapua. Lapua Ballistics Tips: Stability Estimation [Электронный ресурс]. – 2021. URL: https://www.lapua.com/lapua-ballistics-tips-stability-estimation/ (дата обращения: 01.11.2026).
22. Tubb D. 33XC/37XC/41XC Writeup as of May 15, 2023 [Электронный ресурс]. URL: https://www.davidtubb.com/image/data/davidtubb/articles/33XC37XC41XC writeup (5.15.23).pdf (дата обращения: 01.11.2026).
23. Berger Bullets. Bullet Reference Charts [Электронный ресурс]. URL: https://bergerbullets.com/information/lines-and-designs/bullet-reference-charts/ (дата обращения: 04.11.2026).
24. Hornady Manufacturing. Ballistic Coefficient Values [Электронный ресурс]. URL: https://www.hornady.com/BC (дата обращения: 01.11.2026).
25. Vihtavuori. Reloading Data Update Including New Caliber.375 CheyTac [Электронный ресурс]. – 2025. URL: https://vihtavuori.com/reloading-data-update-including-new-caliber-375-cheytac/ (дата обращения: 01.11.2026).
26. Queen of 2 Miles Lindsey Paul.375 CheyTac [Электронный ресурс]. // AccurateShooter Daily Bulletin. – 2021. URL: https://bulletin.accurateshooter.com/2021/10/sunday-gunday-queen-of-2-miles-lindsey-paul-375-cheytac/ (дата обращения: 01.11.2026).
27. Schnur N. Peterson Cartridge First Firing Guide: Minimal Prep for Maximum Brass Life [Электронный ресурс]. Peterson Cartridge. – 2025. URL: https://petersoncartridge.com/blog/first-firing-and-reloading-procedure (дата обращения: 01.11.2026).

28. Sako Ltd. Sako TRG-22/42 Precision Rifle: Owner’s and Maintenance Manual [Электронный ресурс]. – 2014. – 48 P. URL: https://media.sako.global/image/upload/v1691734322/TGR-2242_owner_s_manual_p8zzps.pdf (дата обращения: 04.11.2026).
29. Sako Ltd. TRG 22 A1 / TRG 42 A1: Instruction Manual [Электронный ресурс]. Version 1.9. URL: https://media.sako.global/image/upload/v1691732877/TRG_22_42_A1_instruction_manual_v1.9_gc6vrx.pdf (дата обращения: 04.11.2026).
30. Accuracy International Ltd. AW Rifle System: Technical Brochure [Электронный ресурс]. – 6 P. URL: https://www.eurooptic.com/pdf/aw_brochure.pdf (дата обращения: 04.11.2026).
31. Accuracy International of North America Inc. AXSR Long Action Multi Cal Rifle: Specification Sheet [Электронный ресурс]. – 2025. URL: https://irp.cdn-website.com/1c537ed7/files/uploaded/AXSR_USA_spec_sheet_2025.pdf (дата обращения: 04.11.2026).
32. Hornady Manufacturing Company. Ammunition Test Report and Application Guide [Электронный ресурс]. – 2023. URL: https://static.hornady.media/presscenter/docs/1410996103-1704221297-TAP-Application-Guide.pdf (дата обращения: 04.11.2026).
33. Pearce B.338 Lapua Magnum: Tips and High-Performance Handloads // Handloader. – 2014. – № 291. – P. 46–51. URL: https://bergerbullets.com/articles/brian-pearce-lapua-magnum.pdf (дата обращения: 04.11.2026).
34. Lapua. The Story of.338 Lapua Magnum. Part 2 [Электронный ресурс]. – 2021. URL: https://www.lapua.com/the-story-of-338-lapua-magnum-part-2/ (дата обращения: 04.11.2026).
35. Lapua. Harmon and Fitzpatrick Win ELR Team Title with Lapua 300 Norma Magnum Cases [Электронный ресурс]. – 2026. URL: https://www.lapua.com/harmon-and-fitzpatrick-win-elr-team-title-with-lapua-300-norma-magnum-cases/ (дата обращения: 04.11.2026).

References

1. Bogoslovsky V.N., Zhukov I.G. A New Sporting Rifle Project Chambered in 33XC. Universum: Technical Sciences, 2026, Available at: (accessed 1 November 2026). [Электронный ресурс]. – No. 7 (148). – DOI: 10.32743/UniTech.2026.148.7.23194. – URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23194. (In Russian.).
2. Zhukov I.G. [Tuning the BespokeGun Monolith Competition Rifle Chambered in 33XC: Perfection in Every Detail. Universum: Technical Sciences, 2026, Available at: (accessed 1 November 2026). [Электронный ресурс]. – No. 9 (150). – DOI: 10.32743/UniTech.2026.150.9.23427. – URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23427. (In Russian.).
3. Ultimate Reloader. The 2-Mile Shot: Getting on Target with Paul Phillips (GPG). 2025. Available at: (accessed 1 November 2026) [Электронный ресурс]. – URL: https://ultimatereloader.com/2025/06/08/the-2-mile-shot-getting-on-target-with-paul-phillips-gpg/.
4. Applied Ballistics. The 375 & 338 EnABELR Cartridges. Available at: (accessed 1 November 2026) [Электронный ресурс]. – URL: https://appliedballisticsllc.com/the-375-338-enabelr-cartridges/.

5. Cutting Edge Bullets. King of 2 Miles 2023: Match Recap. 2023. Available at: (accessed 1 November 2026) [Электронный ресурс]. – URL: https://cuttingedgebullets.com/blogs/news/king-of-2-miles-2023-match-recap.
6. ELR Champion Paul Phillips Developing New 33XC Extreme Long-Range Loads. Shooting Sports USA. Available at: (accessed 1 November 2026) [Электронный ресурс]. – URL: https://www.ssusa.org/content/elr-champion-paul-phillips-developing-new-33xc-extreme-long-range-loads/.
7. My Extreme Long Range Shooting Story – Meet Ryan Cheney. Rifle Talks, 2022. Available at: (accessed 1 November 2026) [Электронный ресурс]. – URL: https://www.rifletalks.com/featured-experience/my-extreme-long-range-shooting-story-meet-ryan-cheney/.
8. 33XC Load Development: Efficient Testing for ELR Rifles. Rifle Talks, 2026. Available at: (accessed 1 November 2026) [Электронный ресурс]. – URL: https://www.rifletalks.com/cartridges-by-rifletalks/33-xc/33xc-load-development-efficient-testing/.
9. Hornady Manufacturing. The 12 Rules of Precision Reloading. 2026. Available at: (accessed 1 November 2026) [Электронный ресурс]. – URL: https://www.hornady.com/blog/12-rules-of-precision-reloading.
10. Hornady Manufacturing. For Accurate Data, Sample Size Matters. 2023. Available at: (accessed 1 November 2026) [Электронный ресурс]. – URL: https://www.hornady.com/blog/for-accurate-data-sample-size-matters.
11. Hoham P. How to Load a Hybrid Bullet. Berger Bullets. Available at: (accessed 1 November 2026) [Электронный ресурс]. – URL: https://bergerbullets.com/shoot-better/shooting-knowledge/how-to-load-a-hybrid-bullet/.
12. Hoham P. How to Load a VLD Bullet. Berger Bullets. Available at: (accessed 1 November 2026) [Электронный ресурс]. – URL: https://bergerbullets.com/shoot-better/shooting-knowledge/how-to-load-a-vld-bullet/.
13. Cutting Edge Bullets. Reloading Instructions. Available at: (accessed 1 November 2026) [Электронный ресурс]. – URL: https://cuttingedgebullets.com/blogs/news/reloading-instructions.
14. Meet David Rey, King of 1 Mile 2023 France. Rifle Talks. Available at: (accessed 1 November 2026) [Электронный ресурс]. – URL: https://www.rifletalks.com/featured-experience/meet-david-rey-king-of-1-mile-2023-france/.
15. Barrel Tuner Testing. Episode 55. The Science of Accuracy, 2023. Available at: (accessed 1 November 2026) [Электронный ресурс]. – URL: https://thescienceofaccuracy.com/podcast/55-barrel-tuner-testing/.
16. Zant C. How Do the Best Shooters Reload? What the Pros Use. Precision Rifle Blog, 2024. Available at: (accessed 1 November 2026) [Электронный ресурс]. – URL: https://precisionrifleblog.com/2024/11/10/how-do-the-best-shooters-reload/.
17. Applied Ballistics. Doppler Radar: Personalized Drag Models. Available at: (accessed 1 November 2026) [Электронный ресурс]. – URL: https://appliedballisticsllc.com/doppler-radar/.

18. Litz B. The Evolution of Ballistic Calibration. Applied Ballistics, 2025. Available at: (accessed 1 November 2026) [Электронный ресурс]. – URL: https://appliedballisticsllc.com/wp-content/uploads/2025/01/CDF.pdf.
19. Applied Ballistics. Weapon Employment Zone Analysis (WEZ). Available at: (accessed 1 November 2026) [Электронный ресурс]. – URL: https://appliedballisticsllc.com/weapon-employment-zone-wez/.
20. King of 1 Mile: The Data Behind the Results. Rifle Talks, 2022. Available at: (accessed 1 November 2026) [Электронный ресурс]. – URL: https://www.rifletalks.com/featured-experience/king-of-1-mile-the-data-behind-the-results/.
21. Lapua. Lapua Ballistics Tips: Stability Estimation. 2021. Available at: (accessed 1 November 2026) [Электронный ресурс]. – URL: https://www.lapua.com/lapua-ballistics-tips-stability-estimation/.
22. Tubb D. 33XC/37XC/41XC Writeup as of May 15, 2023. Available at: (accessed 1 November 2026) [Электронный ресурс]. – URL: https://www.davidtubb.com/image/data/davidtubb/articles/33XC37XC41XC writeup (5.15.23).pdf.
23. Berger Bullets. Bullet Reference Charts. Available at: (accessed 4 November 2026) [Электронный ресурс]. – URL: https://bergerbullets.com/information/lines-and-designs/bullet-reference-charts/.
24. Hornady Manufacturing. Ballistic Coefficient Values. Available at: (accessed 1 November 2026) [Электронный ресурс]. – URL: https://www.hornady.com/BC.
25. Vihtavuori. Reloading Data Update Including New Caliber.375 CheyTac. 2025. Available at: (accessed 1 November 2026) [Электронный ресурс]. – URL: https://vihtavuori.com/reloading-data-update-including-new-caliber-375-cheytac/.
26. Queen of 2 Miles Lindsey Paul.375 CheyTac. AccurateShooter Daily Bulletin, 2021. Available at: (accessed 1 November 2026) [Электронный ресурс]. – URL: https://bulletin.accurateshooter.com/2021/10/sunday-gunday-queen-of-2-miles-lindsey-paul-375-cheytac/.
27. Schnur N. Peterson Cartridge First Firing Guide: Minimal Prep for Maximum Brass Life. Peterson Cartridge, 2025. Available at: (accessed 1 November 2026) [Электронный ресурс]. – URL: https://petersoncartridge.com/blog/first-firing-and-reloading-procedure.
28. Sako Ltd. Sako TRG-22/42 Precision Rifle: Owner’s and Maintenance Manual. 2014. Available at: (accessed 4 November 2026) [Электронный ресурс]. – 48 P. – URL: https://media.sako.global/image/upload/v1691734322/TGR-2242_owner_s_manual_p8zzps.pdf.
29. Sako Ltd. TRG 22 A1 / TRG 42 A1: Instruction Manual. Version 1.9. Available at: (accessed 4 November 2026) [Электронный ресурс]. – URL: https://media.sako.global/image/upload/v1691732877/TRG_22_42_A1_instruction_manual_v1.9_gc6vrx.pdf.
30. Accuracy International Ltd. AW Rifle System: Technical Brochure. Available at: (accessed 4 November 2026) [Электронный ресурс]. – 6 P. – URL: https://www.eurooptic.com/pdf/aw_brochure.pdf.

31. Accuracy International of North America Inc. AXSR Long Action Multi Cal Rifle: Specification Sheet. 2025. Available at: (accessed 4 November 2026) [Электронный ресурс]. – URL: https://irp.cdn-website.com/1c537ed7/files/uploaded/AXSR_USA_spec_sheet_2025.pdf.
32. Hornady Manufacturing Company. Ammunition Test Report and Application Guide. 2023. Available at: (accessed 4 November 2026) [Электронный ресурс]. – URL: https://static.hornady.media/presscenter/docs/1410996103-1704221297-TAP-Application-Guide.pdf.
33. Pearce B.338 Lapua Magnum: Tips and High-Performance Handloads. Handloader, 2014. Available at: (accessed 4 November 2026) [Электронный ресурс]. – No. 291. – P. 46–51. – URL: https://bergerbullets.com/articles/brian-pearce-lapua-magnum.pdf.
34. Lapua. The Story of.338 Lapua Magnum. Part 2. 2021. Available at: (accessed 4 November 2026).Lapua. Harmon and Fitzpatrick Win ELR Team Title with [Электронный ресурс]. – URL: https://www.lapua.com/the-story-of-338-lapua-magnum-part-2/.
35. Lapua 300 Norma Magnum Cases. 2026. Available at: (accessed 4 November 2026) [Электронный ресурс]. – URL: https://www.lapua.com/harmon-and-fitzpatrick-win-elr-team-title-with-lapua-300-norma-magnum-cases/.

ЭКОЛОГИЯ И БЕЗОПАСНОСТЬ

ЭКОЛОГИЯ И ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Статья поступила в редакцию: 25.09.2026
Статья принята к публикации: 18.10.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 66.074.3+621.928.9

Научно-практическое обоснование влияния параметров фильтра на гидродинамические и технологические показатели при очистке промышленных пылегазовых потоков

Исомидинов Азизжон Саломидинович
д-р философии по техническим наукам (PhD), доц.
Ферганский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Фергана
E-mail: azizjon.isomidinov@fstu.uz

Хомидов Хушнудбек Рапикжон угли
соискатель
Ферганский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Фергана
E-mail: xomidovxushnudbek207@gmail.com

Scientific and practical substantiation of the influence of filter parameters on hydrodynamic and technological indicators in the purification of industrial dust-gas flows

Isomidinov Azizjon Salomidinovich
PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Fergana State Technical University
Republic of Uzbekistan, Fergana

Khomidov Khushnudbek Rapikjon ugli
Degree Applicant Fergana State Technical University
Republic of Uzbekistan, Fergana

Аннотация

В статье экспериментально исследовано совместное влияние скорости газа, толщины фильтровальной ткани, массовой концентрации пыли, диаметра входного патрубка и продолжительности работы на гидродинамические и технологические показатели рукавного

Библиографическое описание: Исомидинов А.С., Хомидов Х.Р.У. Научно-практическое обоснование влияния параметров фильтра на гидродинамические и технологические показатели при очистке промышленных пылегазовых потоков // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23601

фильтра. В качестве фильтровальной среды использована комбинированная ткань на основе стекловолокна и тефлоновых (ПТФЭ) волокон. Исследования проведены при скорости газа vвх = 10-20 м/с, толщине ткани δ_f = 1,0; 1,2; 1,5 мм, концентрации пыли Сп = 900; 1100; 1300 мг/м³ и диаметре входного патрубка $D_{вх}$ = 130; 150; 170 мм. Для оценки влияния накопления пылевого слоя анализировали начальный режим и интервалы работы 10, 15 и 20 мин.

Установлено, что повышение скорости газа, толщины фильтровальной ткани и пылевой нагрузки увеличивает аэродинамическое сопротивление и сокращает время до регенерации, одновременно повышая степень очистки до предельного значения около 99,75 %. Для контрольной серии Dвх = 150 мм статистическая обработка дала R^2 = 0,992, RMSE = 17,94 Па и MAPE = 3,01 %, что подтверждает воспроизводимость выявленных зависимостей. По совокупности критериев «степень очистки - аэродинамическое сопротивление - продолжительность фильтрационного цикла» рациональной рабочей областью определены vвх = 12-16 м/с и δf = 1,2-1,5 мм. Полученные результаты предназначены для инженерного выбора параметров фильтра в пределах исследованных режимов.

Abstract

In the article, the combined influence of gas velocity, filter fabric thickness, mass dust concentration, inlet branch pipe diameter, and operating duration on the hydrodynamic and technological indicators of a bag filter was experimentally studied. A combined fabric based on glass fiber and Teflon (PTFE) fibers was used as the filter medium. The studies were conducted at a gas velocity v_in = 10–20 m/s, fabric thickness δ_f = 1.0; 1.2; 1.5 mm, dust concentration C_p = 900; 1100; 1300 mg/m³, and inlet branch pipe diameter D_in = 130; 150; 170 mm. To assess the influence of dust layer accumulation, the initial regime and operating intervals of 10, 15, and 20 min were analyzed. It was established that an increase in gas velocity, filter fabric thickness, and dust load increases aerodynamic resistance and reduces the time to regeneration, while simultaneously increasing cleaning efficiency to a limiting value of about 99.75 %. For the control series D_in = 150 mm, statistical processing gave R^2 = 0.992, RMSE = 17.94 Pa, and MAPE = 3.01 %, which confirms the reproducibility of the revealed dependencies. Based on the set of criteria “cleaning efficiency – aerodynamic resistance – filtration cycle duration,” the rational operating range was determined as v_in = 12–16 m/s and δ_f = 1.2–1.5 mm. The obtained results are intended for engineering selection of filter parameters within the studied regimes.

Ключевые слова: . пылегазовый поток, фильтровальная ткань, стекловолокно, тефлоновое волокно, ПТФЭ, аэродинамическое сопротивление, суммарный коэффициент сопротивления, степень очистки, время регенерации, пылевой слой, гидродинамический режим.

Keywords: dust-gas stream, filter fabric, glass fiber, Teflon fiber, PTFE, aerodynamic resistance, total resistance coefficient, purification efficiency, regeneration time, dust layer, hydrodynamic regime.

Введение

В результате технологических процессов, осуществляемых на промышленных предприятиях, в атмосферу выделяется значительное количество пылегазовых потоков. Такие выбросы характерны для промышленности строительных материалов, химической промышленности, металлургии, производства асфальтобетона и других отраслей. Непосредственный выброс пылегазовых потоков в атмосферу приводит к ухудшению экологической обстановки, снижению качества воздуха рабочей зоны и отрицательно влияет на здоровье человека. Поэтому разработка научно обоснованных способов эффективной очистки промышленных пылегазовых потоков является актуальной задачей.

Фильтровальные пылеочистные аппараты широко применяются на практике благодаря высокой степени очистки. Однако их эксплуатационные показатели существенно зависят от структуры фильтровальной среды, свойств материала, параметров газового потока, пылевой нагрузки и продолжительности работы. В частности, увеличение толщины фильтровальной ткани повышает гидродинамическое сопротивление газовому потоку. Кроме того, в процессе работы на поверхности фильтра образуется пылевой слой, который, с одной стороны, формирует дополнительный фильтрующий слой, а с другой стороны, вызывает увеличение потери давления и суммарного сопротивления.

Научный анализ данного процесса позволяет определить эффективные границы работы фильтровальных аппаратов, оптимизировать конструктивные параметры и снизить эксплуатационные затраты. В связи с этим в настоящей работе комплексно исследовано влияние толщины фильтровальной ткани, скорости газа на входе, массовой концентрации пыли, диаметра входного патрубка и фактора времени на основные гидродинамические и технологические показатели фильтровального аппарата.

Современные исследования рукавной фильтрации показывают, что рост перепада давления определяется не только скоростью фильтрации, но и структурой пылевого слоя, влажностью, пылевой нагрузкой, распределением потока и свойствами фильтрующего материала [2-9]. Для ПТФЭ- и стекловолоконных сред особенно важен компромисс между начальным сопротивлением, скоростью его роста при запылении и энергозатратами [4, 5]. Поэтому научная задача данной работы состоит не в констатации факта роста сопротивления, а в количественной оценке совместного влияния конструктивных и режимных факторов на ΔP, время регенерации и эффективность очистки.

Цель исследования заключается в определении влияния параметров фильтра и режимов работы на суммарный коэффициент сопротивления, аэродинамическое сопротивление, время регенерации и степень очистки при фильтрации промышленных пылегазовых потоков, а также в оценке закономерностей их взаимосвязи.

Методика исследования

Исследования проводились в лабораторных условиях на модельной установке рукавного фильтра (рис. 1). В качестве дисперсной фазы использовали пыль минерального сырья, образующуюся после стадии сушки на цементном производстве. По данным предварительного гранулометрического контроля основную долю составляли тонкодисперсные частицы: 1-5 мкм - около 63,7 %, 5-20 мкм - около 31,8 %, 20-40 мкм -

около 4,3 %, более 40 мкм - менее 0,2 %. Пылегазовый поток формировали вентилятором и шнековым дозатором, обеспечивая заданные уровни массовой концентрации перед фильтром.

Рисунок 1. Общий вид установки рукавного фильтра

Скорость газа на входе принималась равной $\upsilon_{вх}$ = 10; 12; 14; 16; 18; 20 м/с. Были исследованы варианты при толщине фильтровальной ткани δ_f = 1,0; 1,2; 1,5 мм, массовой концентрации пыли $\eta_п$ = 900; 1100; 1300 мг/м³ и диаметре входного патрубка $D_{вх}$ = 130; 150; 170 мм. Для оценки изменения процесса во времени были выбраны начальный режим, а также интервалы работы 10, 15 и 20 мин.

В качестве фильтровальной среды применялась комбинированная ткань на основе стекловолокна и тефлоновых (ПТФЭ) волокон. Данный материал отличается высокой термостойкостью, механической прочностью, химической устойчивостью и способностью задерживать мелкодисперсные частицы. Стекловолокно повышает механическую прочность каркаса фильтровальной среды, а тефлоновые волокна обеспечивают химическую инертность поверхности и улучшают условия улавливания и отделения пылевых частиц. Поэтому указанная комбинированная ткань была выбрана в качестве высокоэффективной фильтровальной среды.

В процессе эксперимента определялись суммарный коэффициент сопротивления $\zeta_{об}$, аэродинамическое сопротивление $\Delta P_{об}$, время регенерации τрег и степень очистки η. Аэродинамическое сопротивление оценивалось по величине потери давления, а степень очистки рассчитывалась на основе сравнения массовой концентрации пыли в газе до и после фильтра. Также учитывалось влияние пылевого слоя, формирующегося на внутренней

поверхности фильтра во времени, на работу аппарата. Полученные результаты обрабатывались в виде таблиц и графиков, после чего выполнялся сравнительный анализ для нижней, средней и верхней пылевой нагрузки.

Расход и скорость газа задавали частотным преобразователем Danfoss VLT FC-51 и контролировали электронным анемометром BA06-TROTEC; дополнительно использовали трубку Пито-Прандтля. Перепад давления определяли дифференциальным манометром. Концентрацию пыли на входе поддерживали шнековым дозатором, а запылённость до и после фильтра определяли гравиметрически; массу проб контролировали аналитическими весами A&D HR-250AZ. Измерения скорости и расхода выполняли с учётом требований GOST 12.3.018-79, ISO 3966 и ISO 5167 – 1. Перед каждым опытом проверяли герметичность установки, нулевые показания приборов и стабилизировали расход газа.

Для каждого сочетания vвх, δ_f, Сп и $D_{вх}$ выполняли пять повторных измерений. В обработку принимали среднее арифметическое; случайную составляющую оценивали по стандартному отклонению, а 95 %-ный доверительный интервал - по критерию Стьюдента. Для сопоставления расчётных и опытных значений использовали коэффициент детерминации R^2, среднеквадратическую ошибку RMSE и среднюю абсолютную относительную ошибку MAPE. В контрольной серии при $D_{вх}$ = 150 мм для ΔP получено R^2 = 0,992, RMSE = 17,94 Па и MAPE = 3,01 %. 95 %-ный доверительный интервал среднего расхождения составил от −13,34 до 4,45 Па, а парный t-критерий не выявил систематического смещения между расчётными и опытными значениями (p = 0,307).

Результаты

Результаты исследования показали, что толщина фильтровальной ткани, скорость газа и продолжительность работы существенно влияют на гидродинамический режим аппарата. На рисунке 2 приведено изменение потери давления при нижней и верхней пылевой нагрузке в зависимости от скорости газа на входе для начального режима, а также после 10, 15 и 20 мин работы. Из графиков видно, что уже в начальный момент с увеличением скорости газа величина ΔP возрастает. С течением времени, особенно после 10, 15 и 20 мин работы, накопление пыли на поверхности фильтра приводит к дополнительному увеличению данного показателя. Наибольшие значения наблюдаются при верхней нагрузке и повышенной скорости газа.

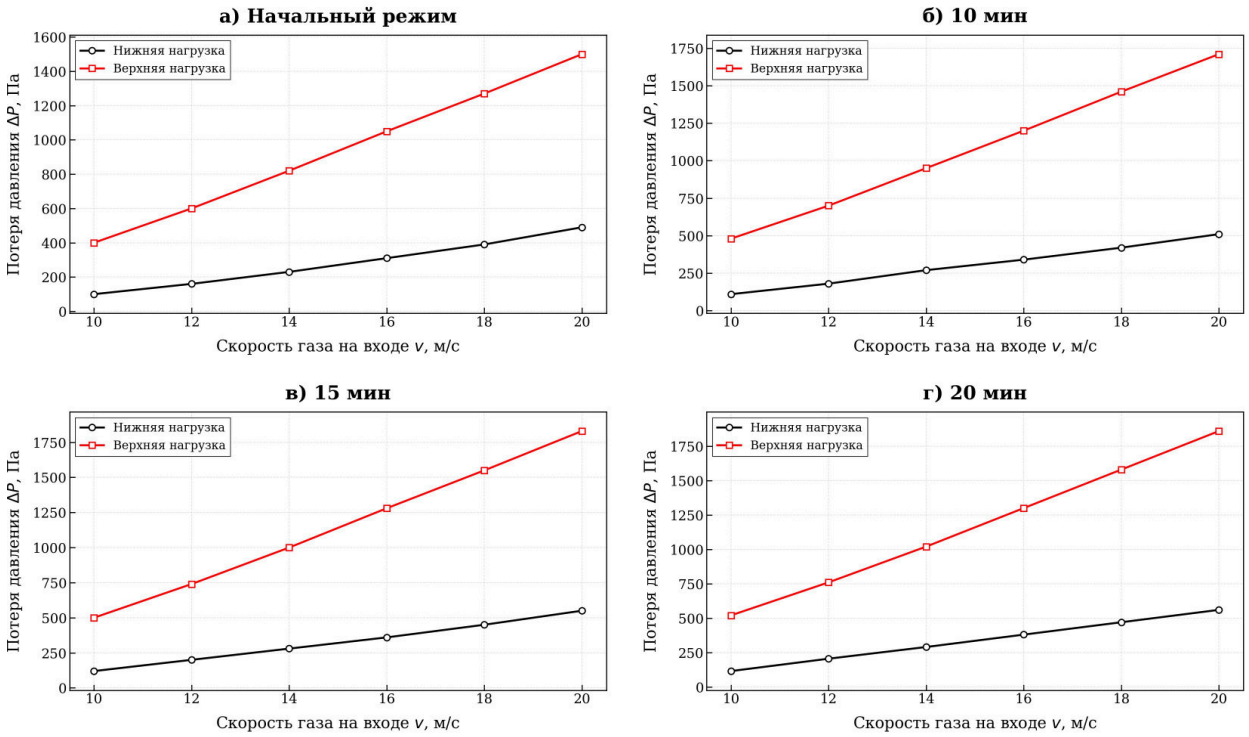


Рисунок 2. Влияние скорости газа на входе и продолжительности работы на потерю давления при нижней и верхней пылевой нагрузке

Указанная закономерность объясняется уплотнением структуры фильтровальной среды и дополнительным сопротивлением, создаваемым пылевым слоем на пути газового потока. При нижней нагрузке потеря давления также возрастает во времени, однако интенсивность роста ниже, чем при верхней нагрузке. Следовательно, толщина фильтровальной ткани, пылевая нагрузка и время работы являются основными факторами, формирующими суммарное сопротивление фильтровального аппарата.

Другие показатели аппарата также были проанализированы относительно скорости газа на входе. На составном рисунке 3 для концентраций Сп = 900; 1100; 1300 мг/м³ представлены четыре взаимосвязанных показателя: суммарный коэффициент сопротивления ζΣ (рис. 3а), аэродинамическое сопротивление ΔРΣ (рис. 3б), время регенерации τрег (рис. 3в) и степень очистки η (рис. 3г).

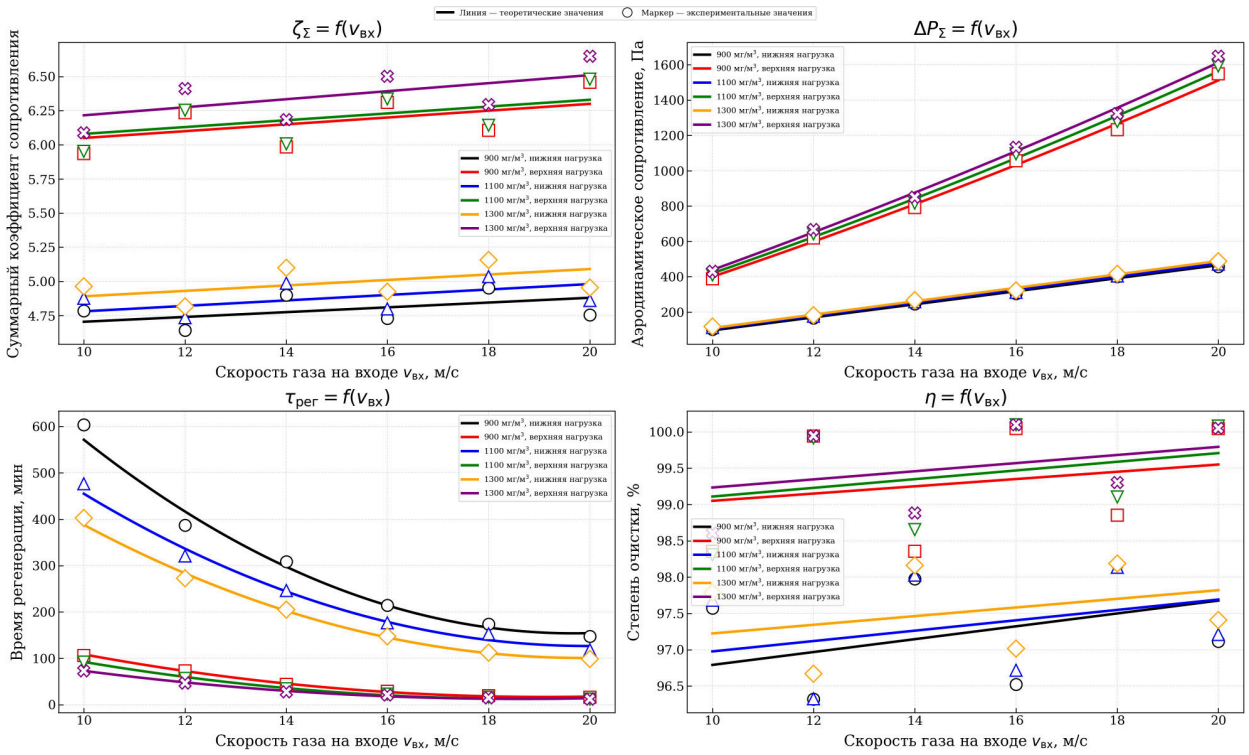


Рисунок 3. (а-г). Влияние скорости газа на входе vвх, массовой концентрации пыли Cп, толщины фильтровальной ткани δf и диаметра входного патрубка Dвх на: а - суммарный коэффициент сопротивления Σζ; б - аэродинамическое сопротивление ΔPΣ; в - время регенерации τрег; г - степень очистки η

Из первого графика видно, что с увеличением vвх суммарный коэффициент сопротивления $\zeta_{об}$ возрастает. Это связано с повышением интенсивности газового потока и усилением местных и общих сопротивлений в фильтровальной среде. На втором графике наблюдается резкий рост аэродинамического сопротивления при увеличении скорости газа. Этот результат подтверждает сильную зависимость $\Delta P_{об}$ от скорости потока. Особенно высокие значения потери давления наблюдаются при повышенной массовой концентрации пыли, большей толщине фильтровальной ткани и верхней нагрузке. Такое поведение объясняется более быстрым формированием пылевого слоя и уменьшением эффективного сечения для прохождения потока.

Третий график показывает, что время регенерации $\tau_{рег}$ уменьшается с ростом скорости газа. Это связано с более быстрым накоплением пыли на поверхности фильтра и сокращением периода до необходимости его восстановления. При нижней нагрузке время регенерации относительно больше, при верхней нагрузке - значительно меньше. Четвертый график показывает, что степень очистки η с увеличением скорости газа возрастает до определенного предела. Это объясняется повышением вероятности столкновения частиц с волокнами фильтровальной среды и их задерживания. Однако во всех случаях степень очистки не достигает 100 %, а максимальное значение ограничивается примерно 99,75 %.

Статистическая проверка подтверждает устойчивость выявленных тенденций. Для контрольной серии при Dвх = 150 мм значения R^2 для зависимостей ΔP(vвх) при δf = 1,0; 1,2 и 1,5 мм составили 0,9922; 0,9919 и 0,9921 соответственно; RMSE находился в пределах 16,8-19,4 Па, а MAPE - около 3,0 %. Следовательно, разброс опытных значений существенно

меньше изменения ΔP, вызванного варьированием скорости и толщины ткани, что позволяет считать эти факторы статистически и технологически значимыми в исследованном диапазоне.

Обсуждение

Полученные результаты подтверждают, что в процессе фильтрации одновременно протекают два основных физических явления. Первое заключается в том, что фильтровальная среда и образующийся в ней пылевой слой создают дополнительное гидродинамическое сопротивление газовому потоку. Второе связано с тем, что этот же пылевой слой служит дополнительной фильтрующей средой для улавливания мелкодисперсных частиц. Поэтому со временем могут одновременно возрастать как сопротивление, так и степень очистки.

Результаты, приведенные на рисунке 2, показывают, что скорость газа, толщина фильтровальной ткани и формирование пылевого слоя имеют решающее значение при росте суммарного сопротивления. Особенно при верхней пылевой нагрузке поры фильтра засоряются быстрее, что приводит к более интенсивному росту $\zeta_{об}$. Это указывает на заметное усложнение гидродинамического режима аппарата при повышенных нагрузках.

Данные рисунка 3 подтверждают, что увеличение скорости газа усложняет аэродинамический режим аппарата. Рост скорости повышает потерю давления и суммарный коэффициент сопротивления, но одновременно улучшает степень очистки. На практике это приводит к противоречию между двумя требованиями: для достижения высокой степени очистки целесообразно увеличить скорость газа до определенного уровня, однако это также повышает аэродинамическое сопротивление и энергозатраты. Поэтому оптимальный режим работы фильтровального аппарата должен выбираться не только по степени очистки, но и с учетом значений $\Delta P_{об}$ и трег.

Сокращение времени регенерации при высокой скорости и верхней нагрузке означает более быстрое загрязнение поверхности фильтра. В условиях эксплуатации это увеличивает частоту восстановления фильтра и влияет на расходы по техническому обслуживанию. Следовательно, при проектировании фильтровальных аппаратов необходимо комплексно учитывать физико-механические свойства фильтровальной ткани, ее толщину, диаметр входного патрубка и параметры режима работы.

Сопоставление с независимыми исследованиями показывает, что полученные тенденции согласуются с современными представлениями о поверхностной фильтрации. Рост скорости фильтрации и накопление пылевого слоя увеличивают сопротивление фильтра [2, 3, 6], а структура и влажность слоя заметно влияют на темп роста ΔP и продолжительность фильтрационного цикла [7]. Для ПТФЭ-сред ранее также показано, что низкое начальное сопротивление не исключает ускоренного роста сопротивления при запылении, поэтому оценка энергетической эффективности должна проводиться на всём цикле работы [4, 5]. Для цементных частиц использование стекловолоконных материалов подтверждает высокую эффективность улавливания при одновременной чувствительности давления к скорости и формированию пылевого слоя [8].

Научная новизна полученных результатов заключается в количественном установлении совместного влияния четырёх факторов - vвх, δf, Сп и Dвх - на гидродинамическое сопротивление, время регенерации и η для комбинированной стекловолоконно-ПТФЭ среды. Практически значимым является не само направление изменения показателей, а определённые диапазоны, в которых рост эффективности перестаёт компенсировать увеличение ΔP и частоты регенерации.

Для инженерного выбора режима результаты следует использовать совместно. В пределах исследованных условий основной рабочей областью целесообразно считать vвх = 12-16 м/с: при ней достигается высокая степень очистки без резкого перехода к верхним значениям аэродинамического сопротивления. Толщина δf = 1,2-1,5 мм повышает улавливание мелкодисперсной пыли, однако должна назначаться с учётом допустимого ΔP и требуемого интервала регенерации. При проектировании также следует учитывать, что аэродинамическая мощность вентилятора пропорциональна Qгаз·ΔP; поэтому уменьшение избыточного перепада давления непосредственно снижает эксплуатационные энергозатраты.

Заключение

Проведённое исследование показало, что гидродинамические и технологические показатели рукавного фильтра формируются совместным действием скорости газа, толщины фильтровальной ткани, пылевой нагрузки и времени накопления пылевого слоя. Для контрольной серии при Dвх = 150 мм увеличение vвх от 10 до 20 м/с приводило к росту расчётного ΔP от 183 до 756 Па при δf = 1,0 мм и от 216 до 881 Па при δf = 1,5 мм; одновременно интервал до регенерации сокращался, а степень очистки возрастала, не превышая примерно 99,75 %. Статистическая обработка подтвердила воспроизводимость гидродинамических зависимостей: для серии Dвх = 150 мм получены R^2 = 0,992, RMSE = 17,94 Па и MAPE = 3,01 %, а парный t-тест не выявил значимого систематического расхождения расчётных и экспериментальных значений (p = 0,307). Это позволяет использовать установленные зависимости для инженерного выбора параметров в пределах исследованного диапазона.

С учётом компромисса «эффективность очистки - аэродинамическое сопротивление - продолжительность цикла» в качестве рациональной рабочей области рекомендуется vвх = 12-16 м/с и δ_f = 1,2-1,5 мм с выбором Dвх по требуемому расходу газа и фактической пылевой нагрузке. Такой подход позволяет перейти от качественного описания ожидаемых тенденций к количественному выбору режима работы и оценке энергетических последствий через зависимость аэродинамической мощности от $Q_{газ}$·ΔP.

Список литературы

1. Green, D.W., Southard, M.Z. eds. Perry’s Chemical Engineers’ Handbook. 9th ed. McGraw-Hill Education. – 2018.
2. Saleem, M., Krammer, G., Khan, R.U., Tahir, M.S. Influence of operating parameters on cake formation in pilot scale pulse-jet bag filter. Powder Technology, 2012, vol. 224, P. 28–35.

3. Dembiński, C., Potok, Z., Dolny, S., Kminiak, R., Rogoziński, T. Performance of filter bags used in industrial pulse-jet baghouses in wood-based panels furniture factory. Applied Sciences, 2021, vol. 11, no. 19, P. 8965.
4. Zhang, W., Deng, S., Wang, Y., Lin, Z. Modeling the surface filtration pressure drop of PTFE HEPA filter media for low load applications. Building and Environment, 2020, vol. 177, P. 106905. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.106905.
5. Zhang, W., Deng, S., Zhang, S., Yang, Z., Lin, Z. Energy consumption performance optimization of PTFE HEPA filter media during dust loading through compositing them with the efficient filter medium. Sustainable Cities and Society, 2022, vol. 78, P. 103657. DOI: 10.1016/j.scs.2021.103657.
6. Lin, X., Zhao, Y., Liu, J. Effect of dust loading rate on pressure drop characteristics of non-high efficiency filter media // Journal of Northeastern University (Natural Science). – 2022. – DOI: 10.12068/j.issn.1005–3026.2022.07.018.
7. Zhou, G., Low, Z.-X., Feng, S., Zhang, F., Zhong, Z., Xing, W. Effect of relative humidity and dust moisture content on filtration performance of bag filter. Separation and Purification Technology, 2023, vol. 308, P. 122952. DOI: 10.1016/j.seppur.2022.122952.
8. da Silva, F.M. O., da Silva, L.G. M., Justi, A.C. A., Rodrigues, M.V., Aguiar, M.L. Use of hybrid filters to optimize the process of the filtration in cement particles. Heliyon, 2023, vol. 9, no. 11, P. e21808. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e21808.
9. Zhang, F., Ding, Y., Low, Z.-X., Jia, L., Zhou, G., Liu, Y., Zhong, Z., Xing, W. Effects of flow distributor structures and particle-wall interaction on baghouse gas-solid flow. Separation and Purification Technology, 2024, vol. 335, P. 126140. DOI: 10.1016/j.seppur.2023.126140.
10. Kwon, H., Min, J.G., Kim, E., Ko, D., Seo, S., Koh, D.J., Byun, Y. Significant decrease of pressure drop and dust emission in novel downflow baghouse dust collector. Results in Engineering, 2025, vol. 28, P. 107564. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.107564.
11. Chang, P.-K., Huang, H.-S., Huang, S.-H., Hsiao, T.-C. Optimizing baghouse performance through analysis of pulse cleaning and filter cake structure. Separation and Purification Technology, 2026, vol. 382, P. 135854. DOI: 10.1016/j.seppur.2025.135854.
12. Abdullayev, I.N., Umirzakov, Z.A. Research on the operation of bag filters for dust and gas cleaning in cement production (on the example of factories in the Ferghana region of the Republic of Uzbekistan). The American Journal of Interdisciplinary Innovations and Research, 2020, vol. 2, no. 11. DOI: 10.37547/tajiir/Volume02Issue11-21.
13. Isomidinov, A.S., Xomidov, X.R. O‘. Study of hydraulic resistance of rotor-filter apparatus. Mekhanika i Tekhnologiya, 2024, vol. 1, no. 14, P. 229–236.
14. Isomidinov, A.S., Xomidov, X.R. O‘., Nematov, B.B. O‘. Calculating the resistance coefficient of glass fiber and Teflon filter fabric. Educational Yield in Best Practice. – 2025.
15. ISO 3966:2020. Measurement of fluid flow in closed conduits – Velocity area method using Pitot static tubes.

16. ISO 5167–1:2022. Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full. Part 1: General principles and requirements // (date of access: 03.10.2026). – 2026. – DOI: 10.1016/j.powtec.2012.02.016 [Электронный ресурс]. URL: https://doi.org/10.3390/app11198965.

Статья поступила в редакцию: 28.10.2026
Статья принята к публикации: 03.11.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 628.33:625.84

DOI: 10.32743/UniTech.2026.152.11.23706

Многослойное водопроницаемое покрытие с функциями очистки, минерализации и регенерации для управления дождевым стоком

Косимова Хилола Абдувоид кизи
базовый докторант
Научно-исследовательский институт технологий охраны окружающей среды и природы при Центрально-Азиатском университете изучения окружающей среды и изменения климата (Green University)
Республика Узбекистан, г. Ташкент
ORCID: 0009-0008-0624-5339
E-mail: khilolakakhkharova@gmail.com

Абдукадирова Малохат Норижоновна
PhD, доц.
Национальный исследовательский университет «Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства»
Республика Узбекистан, г. Ташкент
ORCID: 0000-0003-1188-2662
E-mail: mabduqodirova78@mail.ru

Multilayer permeable pavement with treatment, mineralization and regeneration functions for stormwater management

Kosimova Hilola
Doctoral Student
Research Institute of Environmental and Nature Protection Technologies at the Central Asian University for the Study of the Environment and Climate Change (Green University)
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Abdukadirova Malokhat
PhD, Associate Professor
National Research University Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Библиографическое описание: Косимова Х.А. кизи, Абдукадирова М.Н. Многослойное водопроницаемое покрытие с функциями очистки, минерализации и регенерации для управления дождевым стоком // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23706

Аннотация

Цель работы — обоснование конструкции многослойного водопроницаемого покрытия, совмещающего инфильтрацию дождевого стока, его многоступенчатую очистку, контролируемую минерализацию и регенерацию внутренних слоёв без демонтажа покрытия. Методы: конструктивно-функциональный анализ технического решения, сопоставление предполагаемых механизмов работы слоёв с опубликованными экспериментальными данными и стехиометрическая оценка минерализующей способности доломита. Результаты. Предложена последовательность функциональных слоёв: водопроницаемый бетон, кварцевый песок, природный цеолит, гидрофобизированный перлит с торфом, смесь цеолита и доломитовой крошки и дренажные слои; для промывки и/или продувки предусмотрены вертикальные перфорированные трубы. Конструкция проектно разделяет функции фильтрации, сорбции и биологической обработки, однако защита от кольматации и эффективность очистки экспериментально не подтверждены. В иллюстративном расчётном сценарии при P = 400 мм/год, ψ = 1 и условном приросте общей жёсткости ΔЖ = 1 мг-экв/л теоретическая потребность составляет около 18,4 г доломита/(м²·год); это не норматив полива и не измеренный расход. Заключение. Работа носит конструктивно-теоретический характер; предложена программа лабораторной проверки удаления загрязнений, изменения качества воды и восстановления гидравлической проводимости. Пригодность фильтрата для полива должна оцениваться по результатам испытаний с учётом конкретных почв, растений и способа орошения.

Abstract

Purpose: to substantiate a multilayer permeable pavement combining stormwater infiltration, staged treatment, controlled mineralization and regeneration of internal layers without pavement removal. Methods: structural and functional analysis of the design, comparison of the proposed layer functions with published experimental evidence, and a stoichiometric estimate of dolomite mineralization. Results. The proposed sequence comprises permeable concrete, quartz sand, natural zeolite, hydrophobized perlite with peat, a zeolite–dolomite mixture and drainage layers; vertical perforated pipes are provided for backwashing and/or air scouring. The design assigns filtration, sorption and biological treatment functions to separate layers, but clogging protection and treatment performance have not been experimentally verified. In an illustrative calculation scenario (P = 400 mm/year, ψ = 1, and an assumed increase in total hardness ΔЖ = 1 meq/L), the theoretical dolomite demand is about 18.4 g/(m²·year); this is neither an irrigation standard nor a measured consumption rate. The study is design-oriented and theoretical; a laboratory validation programme is proposed to assess pollutant removal, water quality changes and hydraulic conductivity recovery. Filtrate suitability for irrigation must be evaluated for the specific soil, crop and irrigation method.

Ключевые слова: водопроницаемое покрытие, дождевой сток, цеолит, тяжёлые металлы, нефтепродукты, доломит, регенерация.

Keywords: permeable pavement, stormwater, zeolite, heavy metals, petroleum hydrocarbons, dolomite, regeneration.

Финансирование: исследование выполнено без внешнего финансирования.

Funding: The study received no external funding.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

Благодарности: При подготовке рукописи использовался инструмент ChatGPT для языкового редактирования отдельных фрагментов текста. Авторы проверили и утвердили окончательный вариант рукописи и несут ответственность за её содержание.

Acknowledgements: ChatGPT was used to edit the English language of selected sections of the manuscript. The authors reviewed and approved the final text and take full responsibility for its content.

Введение

Рост доли водонепроницаемых поверхностей в городах — дорог, парковок, тротуаров — сокращает инфильтрацию осадков, увеличивает объём и пиковые расходы поверхностного стока и усиливает нагрузку на ливневую канализацию. Сток с транспортных территорий переносит взвешенные вещества, тяжёлые металлы, нефтепродукты и полициклические ароматические углеводороды, поступающие в водные объекты без очистки.

Водопроницаемые покрытия относятся к базовым решениям концепций устойчивого городского водоотведения (SUDS), малоэффективного воздействия (LID) и водочувствительного городского проектирования (WSUD) [9; 16]. Помимо снижения стока, они уменьшают концентрации ряда загрязнений за счёт фильтрации, сорбции и биологических процессов [8; 11]. Вместе с тем широкое внедрение таких покрытий сдерживается недостаточным пониманием влияния типа покрытия, материалов, крупности заполнителей, толщины основания и порядка слоёв на их гидравлические и экологические характеристики [13].

Наиболее изученной группой загрязнений являются тяжёлые металлы. Их взвешенная форма удерживается фильтрацией, тогда как механизмы удаления растворённой формы остаются предметом исследований; при интенсивных осадках возможно обратное вымывание ранее задержанных металлов [12]. Установлено, что в поверхностном слое покрытия металлы удаляются преимущественно ионным обменом, а в основании и подстилающем слое — хемосорбцией [18]. Природные цеолиты исследовались для очистки дорожного стока от Pb, Cu, Zn и Cd [14]. В пилотной системе с цеолитом или базальтом в качестве материала основания удаление Cd, Cu и Pb составляло соответственно 41–72 %, 67–74 % и 61–72 %; при этом концентрации металлов в фильтрате не достигли рекомендованных показателей качества пресных вод. В отдельном варианте последующая колонка с наноструктурированным титанатным сорбентом и гранулированным активированным углём повысила удаление металлов [17]. Эти результаты относятся к опубликованной пилотной установке, а не к предлагаемой конструкции. Следовательно, одного сорбционного слоя может быть недостаточно, и многоступенчатая обработка требует проверки.

Нефтепродукты и органические микрозагрязнители требуют иных механизмов удержания: в фильтрующих системах их удаление повышается при введении органических добавок (компост, биоуголь) и создании условий для биодеградации [22]. Третья проблема —

кольматация: накопление осадка снижает инфильтрационную способность покрытия, а поверхностная очистка не всегда восстанавливает проницаемость сильно заилённых участков [15; 19; 20].

Для Ташкента эта задача имеет непосредственное практическое значение. Генеральный план города до 2045 г., утверждённый в декабре 2024 г., предусматривает увеличение площади зелёных насаждений примерно на 10 тыс. га к существующим 7,1 тыс. га и создание зелёного пояса площадью 15 тыс. га [4], что резко повышает потребность в поливной воде. Одновременно городская ливневая сеть рассчитана на приём до 20 мм осадков в сутки: 10 мая 2026 г. менее чем за два часа выпало 35 мм, и подтопления были зафиксированы по 23 адресам в 8 районах [1]. Постановлением Президента Республики Узбекистан от 27.07.2026 № ПП-279 предусмотрено до 2031 г. строительство закрытой дренажной системы и сооружений для сбора дождевой воды для полива зелёных зон, а также создание при хокимияте Центра управления водными ресурсами, в задачи которого входит ведение водного баланса и повторное использование воды [2]. Сбор дождевого стока с транспортных территорий для полива требует его предварительной очистки от взвешенных веществ, тяжёлых металлов и нефтепродуктов; водопроницаемое покрытие с очистными функциями позволяет выполнить эту очистку непосредственно в месте образования стока, одновременно снижая пиковую нагрузку на ливневую сеть.

Таким образом, актуальна задача объединения в одной конструкции механической фильтрации, сорбции металлов, удержания и биотрансформации нефтепродуктов, корректировки ионного состава воды и регенерации внутренних слоёв. Известные патентные решения ограничиваются сочетанием пористого несущего слоя с дренажным основанием либо требуют отдельной системы доочистки (горизонтальных сорбционных колонн и колодцев), что усложняет строительство [3; 17]. Разработанное авторами решение защищено патентом Республики Узбекистан UZ IAP 8682 [3].

Цель работы — научно-техническое обоснование конструкции многослойного водопроницаемого покрытия с функциями очистки, минерализации и регенерации. **Задачи**: обосновать последовательность и назначение функциональных слоёв; оценить минерализующую способность доломитовой составляющей; проанализировать систему регенерации в сравнении с известными методами обслуживания; сформировать программу экспериментальной верификации.

Материалы и методы

Объект исследования — многослойное водопроницаемое покрытие (рис. 1), включающее сверху вниз: несущий слой из водопроницаемого бетона; механический фильтрующий слой из крупнозернистого кварцевого песка; слой природного цеолита; олеофильный биоактивный слой из гидрофобизированного перлита и торфа с иммобилизованными углеводородокисляющими бактериями; ионообменно-минерализующий слой из смеси цеолита и доломитовой крошки; дренажный слой из щебня; нижнюю часть дренажного слоя из крупного гравия фракции 50–100 мм; песчано-гравийный переходный слой, опирающийся на нативный грунт. Указанные в табл. 1 толщины являются предварительными проектными диапазонами: для функциональных подслоёв 3–5 задана только суммарная толщина 10–15 см, для дренажных слоёв 6 и 8 — суммарная толщина 15–

30 см. Толщина каждого из подслоёв 3–5 отдельно не установлена. Пористость бетона 15–25 % также является проектным диапазоном, а не результатом измерения образца. На глубину нижней части дренажного слоя вертикально установлены перфорированные полиэтиленовые трубы регенерации со съёмными заглушками в верхней части [3]. Нумерация элементов на рис. 1 и в табл. 1 соответствует описанию патента.

Методы

Использован конструктивно-функциональный анализ: для каждого слоя определены целевые загрязнения и механизм их удержания, которые сопоставлены с опубликованными экспериментальными данными по водопроницаемым покрытиям, сорбционным и минерализующим материалам. Минерализующая способность доломита оценена стехиометрически по реакции его растворения в воде, содержащей растворённый CO2:

$CaMg(CO_3)_2 + 2CO_2 + 2H_2O \rightarrow Ca^{2+} + Mg^{2+} + 4HCO_3^-$.

Расход доломита на минерализацию инфильтрата оценён по формуле

$$m_д = \frac{P \cdot \psi \cdot \Delta Ж \cdot M_д}{4 \cdot 1000} \quad (1)$$

где mд — удельный годовой расход доломита, г/(м²·год); P — годовой слой осадков, мм (л/м²); ψ — доля осадков, фильтрующихся через покрытие; ΔЖ — заданный расчётный прирост общей жёсткости фильтрата, мг-экв/л; Мд = 184,4 мг/ммоль — молярная масса доломита; множитель 4 учитывает, что растворение 1 ммоль доломита даёт 4 мг-экв жёсткости (Ca2+ и Mg2+ по 2 мг-экв).

Для последующей экспериментальной оценки конструкции предложены два интегральных показателя. Эффективность удаления загрязняющего компонента:

$$R = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \cdot 100\% \quad (2)$$

где C_0 и C_e — концентрации компонента в исходном стоке и в фильтрате, мг/л. Коэффициент восстановления гидравлической проводимости после регенерации:

$$K_r = \frac{K_a}{K_0} \cdot 100\% \quad (3)$$

где K_0 — исходный коэффициент фильтрации покрытия, K_a — коэффициент фильтрации после цикла «кольматация — регенерация», м/сут.

Результаты и обсуждение

Функциональная структура покрытия

Схема покрытия приведена на рис. 1, назначение слоёв — в табл. 1. При штатной работе фильтрационный поток движется сверху вниз через функциональные материалы; проектом предусмотрен регенерационный поток снизу вверх от перфорированных труб. Фактическое распределение потоков и сохранение слоистости требуют стендовой проверки.

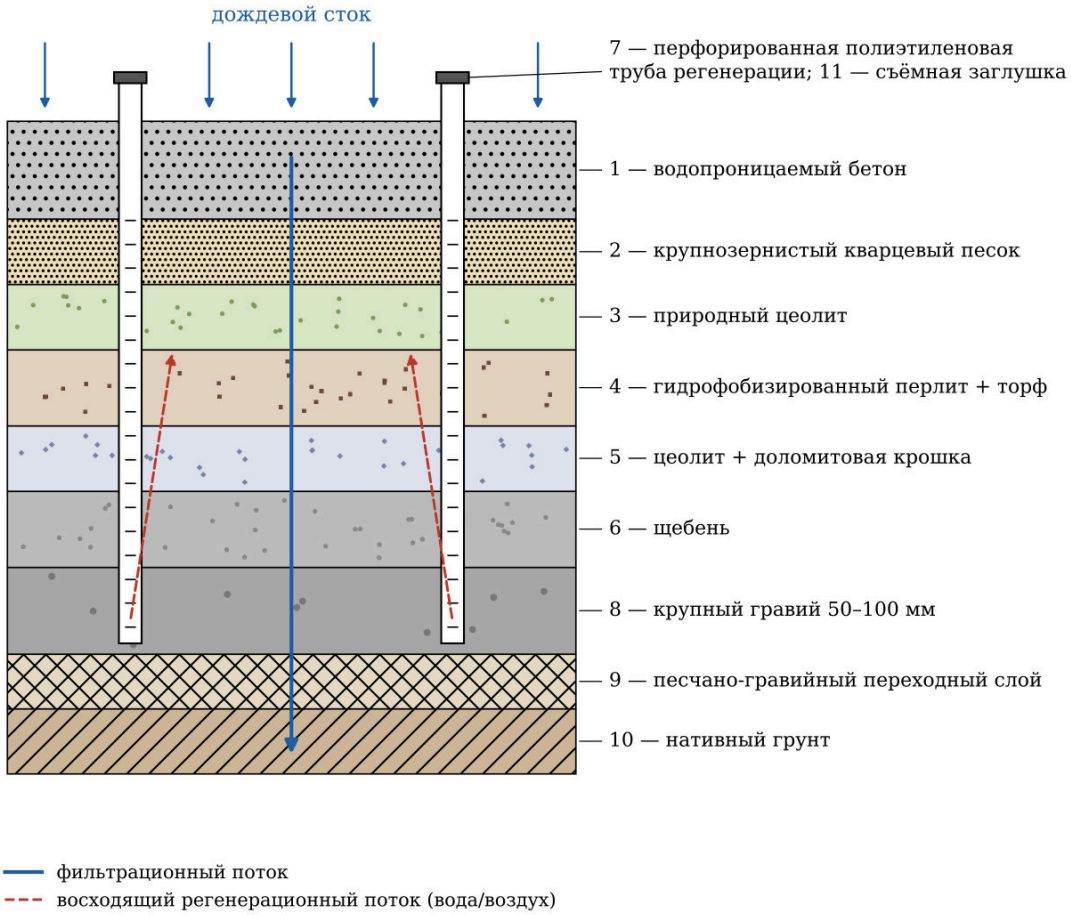


Рисунок 1. Схема многослойного водопроницаемого покрытия (без соблюдения масштаба; нумерация по патенту [3])

Таблица 1. Назначение функциональных слоёв покрытия

№	Материал	Толщина, см	Целевые загрязнения	Механизм
1	Водопроницаемый бетон (пористость 15–25 %)	5–10	Крупные частицы, мусор	Приём стока, несущая функция, поверхностная фильтрация
2	Крупнозернистый кварцевый песок	8-10	Взвешенные вещества, металлы во взвешенной форме	Механическая фильтрация, защита нижних слоёв от кольматации
3	Природный цеолит	в общей толщине 10–15	Растворённые Pb, Cu, Zn, Cd	Ионный обмен, адсорбция
4	Гидрофобизированный перлит + торф		Нефтепродукты, органические соединения	Олеофильная сорбция, биодеградация
5	Цеолит + доломитовая крошка		Остаточные металлы; ионный состав воды	Ионный обмен, растворение доломита, нейтрализация
6	Щебень	в общей толщине 15–30	—	Дренаж
8	Крупный гравий 50–100 мм		—	Дренаж, распределение регенерационного потока
9	Песчано-гравийная смесь	15-20	Мелкие частицы	Переход к грунту, доочистка
7, 11	Перфорированные трубы ПЭ с заглушками	до слоя 8	Накопленный осадок	Промывка водой и/или продувка воздухом снизу вверх

№	Материал	Толщина, см	Целевые загрязнения	Механизм
10	Нативный грунт	—	—	Приём инфильтрата

** суммарная проектная толщина функциональных подслоёв 3–5 — 10–15 см; индивидуальная толщина каждого подслоя не установлена. ** суммарная проектная толщина дренажных слоёв 6 и 8 — 15–30 см.*

Исходные характеристики материалов и статус параметров

В патентном описании и исходных данных рукописи не приведены результаты ситового анализа песка, щебня и цеолита, удельная поверхность и сорбционная ёмкость местного цеолита, доли цеолита и доломитовой крошки, соотношение перлита и торфа, характеристики гидрофобизации, штамм и активность иммобилизованных бактерий, а также измеренная пористость бетона. Поэтому в табл. 1 приведены только имеющиеся проектные диапазоны; фракция 50–100 мм относится к крупному гравию. Перед изготовлением опытной колонны следует определить гранулометрический состав ситовым анализом, пористость и коэффициент фильтрации, сорбцию Pb/Cu/Zn/Cd и нефтепродуктов, кислотонейтрализующую способность доломита и рабочие условия биоактивного слоя. Доли компонентов и индивидуальные толщины функциональных подслоёв здесь не выдумываются и должны выбираться по результатам таких измерений.

Обоснование последовательности слоёв

Порядок слоёв предложен исходя из трёх проектных принципов. Первый — снижение поступления взвешенных частиц к сорбентам: песчаный фильтр расположен выше цеолита, поскольку значительная доля металлов в стоке связана с твёрдыми частицами [12]; степень фактической защиты от кольматации должна быть проверена. Второй — последовательное снижение нагрузки: цеолит (слой 3) предназначен для удержания основной части растворённых металлов, а цеолитовая составляющая слоя 5 — для дополнительной сорбции. Пилотное исследование с цеолитовой загрузкой показало, что концентрации металлов в фильтрате могут оставаться выше рекомендованных показателей качества пресных вод; в нём также изучался дополнительный постфильтр [17]. Это обосновывает необходимость проверки всей последовательности, но не доказывает эффективность предлагаемой системы.

Третий принцип — разделение функций по типу загрязнения. Минеральные загрязнения предполагается направлять к ионообменным слоям, углеводородные — к олеофильному биоактивному слою, в котором гидрофобизированный перлит должен удерживать нефтепродукты, а торф служить органическим субстратом для микроорганизмов. Эффективность органических добавок для удержания органических микрозагрязнителей отмечена в обзоре [22]. Фактическая работа слоя с иммобилизованными микроорганизмами, включая активность штамма и устойчивость к температуре, pH и режиму увлажнения, в данной работе не исследовалась.

Доломитовая составляющая расположена в нижнем функциональном слое: растворение доломита может повышать pH и при определённых условиях способствовать иммобилизации потенциально токсичных элементов [5]. Размещение после основных сорбционных стадий задумано для уменьшения влияния изменения pH на вышележащие слои, однако этот эффект также требует экспериментальной проверки.

Оценка минерализующей способности доломита

Стехиометрические соотношения растворения доломита приведены в табл. 2. При полном растворении 1 г доломита теоретически образуются 217 мг Ca2+, 132 мг Mg2+ и 1324 мг HCO3–. Для прироста общей жёсткости на 1 мг-экв/л стехиометрически требуется 0,25 ммоль/л, то есть около 46,1 мг/л доломита. Это теоретическая оценка при полном растворении, а не измеренная минерализующая способность используемого материала.

Таблица 2. Стехиометрический выход ионов при растворении доломита

Показатель	**На 1 г доломита, мг**	**На прирост жёсткости 1 мг-экв/л, мг/л**
Растворённый доломит	1000	46,1
Ca^{2+}	217	10,0
Mg^{2+}	132	6,1
HCO_3^-	1324	61,0

Для иллюстрации чувствительности расчёта по формуле (1) приняты условные P = 400 мм/год и ψ = 1. При заданном, не являющемся нормативом, приросте жёсткости ΔЖ = 0,5; 1 и 2 мг-экв/л расчётный расход составляет соответственно около 9,2; 18,4 и 36,9 г/(м²·год). При ψ < 1 значения пропорционально уменьшаются. Сценарий ΔЖ = 1 мг-экв/л выбран только для демонстрации зависимости, а не как целевой показатель воды для полива. Расчёт предполагает полное растворение доломита и не учитывает кинетику, пассивацию зёрен, изменение pH и состав конкретного стока; срок службы и фактический прирост жёсткости без лабораторных и натурных испытаний определить нельзя.

Время контакта воды с функциональными подслоями при насыщенном режиме фильтрации можно оценить как

$$t = \frac{h \cdot n_e}{q} \tag{4}$$

При насыщенном режиме ориентировочное время контакта воды с функциональными подслоями можно оценить как h·ne/q. При h = 0,10–0,15 м, принятом для сценарной оценки ne = 0,4 и условном удельном потоке фильтрации q = 30 мм/ч расчёт даёт 1,3–2,0 ч. Это идеализированная оценка для заданного потока, а не подтверждённая характеристика конструкции; фактическое время зависит от гранулометрического состава, пористости, ненасыщенности, распределения потоков и кольматации и должно определяться трассерными испытаниями.

Минерализация может влиять на последующее использование воды. При оценке поливной пригодности нельзя опираться только на общую жёсткость: необходимо совместно учитывать электропроводность (EC), натриевое адсорбционное отношение (SAR), содержание Ca2+, Mg2+ и Na+, а также свойства почвы, культуру и способ орошения [6]. Добавление Ca2+ и Mg2+ может изменить SAR, но одновременно увеличить электропроводность; поэтому оно не доказывает пригодность фильтрата для полива или пополнения грунтовых вод. Универсальная целевая величина ΔЖ в этой работе не задаётся.

Изменение pH и ионного состава также влияет на подвижность отдельных элементов. В работе [5] доломитовая добавка исследовалась как средство нейтрализации кислой среды и иммобилизации потенциально токсичных элементов, однако полученные авторами результаты относятся к конкретной конструкции и гидрологическим условиям. В предлагаемой системе необходимо одновременно измерять pH, электропроводность, общую жёсткость, Ca2+, Mg2+, Na+ и содержание тяжёлых металлов; до получения этих данных вывод о пригодности воды для повторного использования делать нельзя.

Регенерация внутренних слоёв

Кольматация остаётся главным эксплуатационным ограничением водопроницаемых покрытий [15]. Полевые наблюдения показали снижение скорости инфильтрации пористого бетона за год на 26–59 %; уборка подметально-вакуумными машинами восстанавливала её лишь на 21–30 % и не справлялась с сильно заилёнными участками, тогда как промывка под давлением с последующим вакуумированием восстанавливала инфильтрацию полностью [19]. Аналогичные выводы получены при сравнении подметания, вакуумной очистки, промывки под давлением и фрезерования [20], а также в канадских исследованиях, где ключевым условием успеха названо взмучивание осадка в порах [10]. Однако все эти методы воздействуют на покрытие сверху и не достигают нижних слоёв [7].

Наиболее близким аналогом предлагаемой системы является метод обратной промывки пористого бетона: в двухлетнем полевом сравнении он превзошёл традиционные способы обслуживания, а степень восстановления проницаемости зависела от состояния кольматации и скорости промывочного потока в порах [21]. Предлагаемая конструкция проектно развивает этот подход (рис. 2): подача воды и/или сжатого воздуха через трубы в нижний гравийный слой должна формировать восходящий поток через функциональные слои. Крупный гравий фракции 50–100 мм предназначен для распределения потока по площади. Эффективность промывки, равномерность потока и риск перемешивания загрузок пока не проверены.

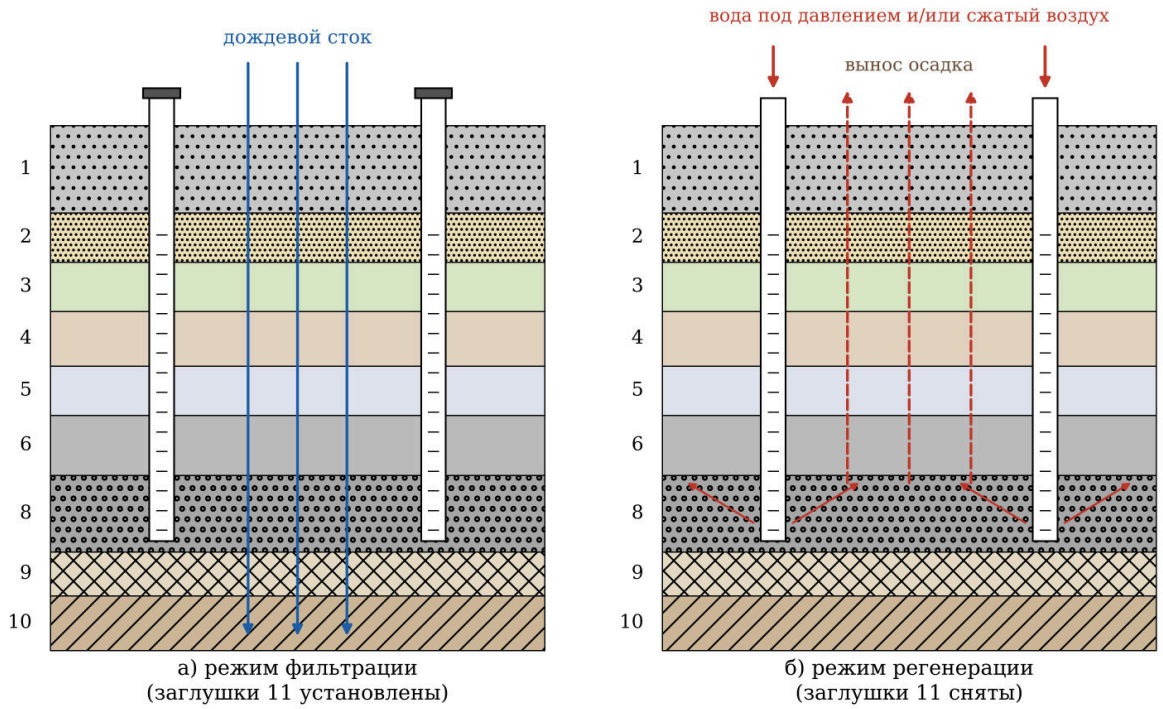


Рисунок 2. Режимы работы покрытия: а — фильтрация; б — регенерация восходящим потоком через трубы 7

Для практической реализации требуется определить давление и расход промывной воды, интенсивность подачи воздуха, продолжительность и периодичность регенерации, радиус действия одной трубы (шаг размещения), а также риск выноса мелких фракций и перемешивания смежных слоёв. Эти параметры нельзя считать установленными без испытаний; может потребоваться разделение слоёв геотекстилем.

Сопоставление с существующими решениями

Функциональное сравнение предлагаемой конструкции с традиционными и модифицированными водопроницаемыми покрытиями приведено в табл. 3. Сравнение носит качественный характер; количественное сопоставление возможно только по результатам испытаний в сопоставимых условиях.

Таблица 3. Функциональное сравнение водопроницаемых покрытий

Функция	**Традиционное покрытие**	**Модифицированное фильтрующее покрытие**	**Предлагаемая конструкция**
Инфильтрация стока	+	+	+
Механическая фильтрация	+	+	+
Удаление растворённых металлов	ограниченно	+	+ (две ступени)
Удержание нефтепродуктов	ограниченно	зависит от загрузки	+
Биодеградация углеводородов	спонтанно	возможно	предусмотрена
Контролируемая минерализация	–	как правило, нет	предусмотрена
Регенерация внутренних слоёв	–	зависит от конструкции	встроенная

Функция	Традиционное покрытие	Модифицированное фильтрующее покрытие	Предлагаемая конструкция
Демонтаж при обслуживании	может потребоваться	зависит от системы	не требуется

Предлагаемая конструктивная особенность состоит в совместной компоновке известных материалов в вертикальную систему: цеолитовая сорбция, олеофильный биоактивный слой и доломитовая минерализация разделены по высоте, а трубы регенерации встроены в дренаж. Это проектная концепция локального очистного сооружения; её сравнительные преимущества и работоспособность должны быть подтверждены испытаниями.

Программа экспериментальной верификации

Настоящая работа основана на конструктивном анализе и опубликованных данных; собственные экспериментальные данные отсутствуют, что является основным ограничением исследования. Для верификации предлагается лабораторная колонная модель с той же последовательностью слоёв на синтетическом и натурном дождевом стоке. Следует контролировать: гидравлические показатели (скорость инфильтрации, коэффициент фильтрации и их изменение при кольматации и после регенерации — формула (3)); качество воды (pH, электропроводность EC, общую жёсткость, SAR, Ca2+, Mg2+, Na+, Pb, Cu, Zn, Cd, нефтепродукты и взвешенные вещества — формула (2)); эксплуатационные параметры (объём до проскока, число циклов регенерации и изменение сорбционной ёмкости). Для определения пригодности воды к поливу результаты следует сопоставлять с требованиями конкретной почвы, растений и способа орошения по подходу FAO [6], а не с произвольно заданным приростом жёсткости. До испытаний не установлены оптимальные толщины и гранулометрия слоёв, доли цеолита и доломита, соотношение перлита и торфа, сорбционные ёмкости материалов, активность микроорганизмов и режимы регенерации.

Заключение

1. На основе конструктивного анализа и данных литературы предложена многослойная схема, объединяющая механическую фильтрацию, предполагаемую ионообменную сорбцию на природном цеолите, удержание и потенциальную биотрансформацию нефтепродуктов, доломитовую минерализацию, дренаж и инфильтрацию в грунт.

2. Порядок слоёв проектно разделяет функции фильтрации, сорбции и обработки органических загрязнений. Защита сорбентов от кольматации, двухступенчатое удаление металлов и снижение влияния pH требуют проверки на колонной модели и не рассматриваются как экспериментально подтверждённые результаты.

3. Стехиометрический сценарный расчёт при условных P = 400 мм/год, ψ = 1 и ΔЖ = 1 мг-экв/л даёт около 46,1 мг/л доломита и 18,4 г/(м²·год); ресурс минерализующего слоя определяется кинетикой растворения и пассивацией зёрен, а не запасом материала.

4. Конструкцией предусмотрены вертикальные перфорированные трубы для восходящей промывки водой и/или продувки воздухом без демонтажа покрытия, что отличает её от поверхностных методов обслуживания.

5. До инженерного проектирования необходимы лабораторные и натурные испытания для определения эффективности удаления загрязнений, изменения pH, EC, SAR и ионного состава воды, оптимальной гранулометрии и толщин, коэффициента восстановления гидравлической проводимости и параметров регенерации.

Список литературы

1. 10 мая в Ташкенте выпало более половины среднемесячной нормы осадков [Электронный ресурс]. // Kun.uz. – 2026. URL: https://www.kun.uz/ru/news/2026/05/11/10-maya-v-tashkente-vypalo-boleye-poloviny-srednemesyachnoy-normy-osadkov (дата обращения: 24.10.2026).
2. О дополнительных мерах по социально-экономическому развитию города Ташкента в 2026годах: постановление Президента Республики Узбекистан от 27.07 [Электронный ресурс]. – № ПП–279. – 2027. URL: https://lex.uz/ru/docs/8370133 (дата обращения: 24.10.2026).
3. Абдукадирова М.Н., Косимова Х.А. Многослойное водопроницаемое покрытие: патент Республики Узбекистан UZ IAP 8682, МПК E01C 11/00, C02F 1/28; заявители и патентообладатели: Косимова Х.А., Абдукадирова М.Н. – Заявка № IAP 20260324; заявл. 22.04.2026; опубл. 28.08.2026. – Бюл. № 8 (304).
4. Об утверждении генерального плана города Ташкента на период до 2045 года: постановление Кабинета Министров Республики Узбекистан от 24.12. [Электронный ресурс]. – 2024. – № 880. URL: https://lex.uz/ru/docs/7281639 (дата обращения: 24.10.2026).
5. Al-Amin A., McKenzie E.R. Dolomite dissolution, pH neutralization, and potentially toxic element immobilization in stormwater bioretention beds // Science of the Total Environment. – 2025. – T. 961. – Art. 178369. – DOI: 10.1016/j.scitotenv.2025.178369.
6. Ayers R.S., Westcot D.W. Water quality for agriculture. FAO Irrigation and Drainage Paper 29, Rev. 1. – Rome: FAO, 1985. – 174 P.
7. Drake J., Bradford A. Assessing the potential for restoration of surface permeability for permeable pavements through maintenance // Water Science and Technology. – 1958. – T. 68, № 9. – P. 1950–1958. – DOI: 10.2166/wst.2013.450.
8. Drake J.A.P., Bradford A., Marsalek J. Review of environmental performance of permeable pavement systems: state of the knowledge // Water Quality Research Journal of Canada. – 2013. – T. 48, № 3. – P. 203–222. – DOI: 10.2166/wqrjc.2013.055.
9. Franco E., Ghisi E., Vaz I.C. M., Thives L.P. Permeable pavements: an integrative review of technical and environmental contributions to sustainable cities // Water. – 2025. – T. 17, № 22. – Art. 3323. – DOI: 10.3390/w17223323.
10. Henderson V., Tighe S.L. Evaluation of pervious concrete pavement permeability renewal maintenance methods at field sites in Canada // Canadian Journal of Civil Engineering. – 2011. – T. 38, № 12. – P. 1404–1413. – DOI: 10.1139/l11-105.
11. Imran H.M., Akib S., Karim M.R. Permeable pavement and stormwater management systems: a review // Environmental Technology. – 2013. – T. 34, № 18. – P. 2649–2656. – DOI: 10.1080/09593330.2013.782573.

12. Kuruppu U., Rahman A. Evaluation of permeable pavement systems for removing heavy metals from stormwater // Water. – 2023. – T. 15, № 8. – Art. 1573. – DOI: 10.3390/w15081573.
13. Kuruppu U., Rahman A., Rahman M.A. Permeable pavement as a stormwater best management practice: a review and discussion // Environmental Earth Sciences. – 2019. – T. 78, № 10. – Art. 327. – DOI: 10.1007/s12665-019-8312-2.
14. Pitcher S.K., Slade R.C.T., Ward N.I. Heavy metal removal from motorway stormwater using zeolites // Science of the Total Environment. – 2004. – T. 334. – P. 161–166. – DOI: 10.1016/j.scitotenv.2004.04.035.
15. Razzaghmanesh M., Beecham S. A review of permeable pavement clogging investigations and recommended maintenance regimes // Water. – 2018. – T. 10, № 3. – Art. 337. – P. 1–9. – DOI: 10.3390/w10030337.
16. Scholz M., Grabowiecki P. Review of permeable pavement systems // Building and Environment. – 2007. – T. 42, № 11. – P. 3830–3836. – DOI: 10.1016/j.buildenv.2006.11.016.
17. Sounthararajah D.P., Loganathan P., Kandasamy J., Vigneswaran S. Removing heavy metals using permeable pavement system with a titanate nano-fibrous adsorbent column as a post treatment // Chemosphere. – 2017. – T. 168. – P. 467–473. – DOI: 10.1016/j.chemosphere.2016.11.045.
18. Sun Y., Jian M., Cheng Y. et al. Understanding the removal of heavy metals from stormwater runoff in permeable pavement system // Science of the Total Environment. – 2024. – T. 930. – Art. 172642. – DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.172642.
19. Suozzo M., Dewoolkar M.M. Long-term field monitoring and evaluation of maintenance practices for pervious concrete pavement in Vermont // Transportation Research Record. – 2012. – T. 2292. – P. 94–103. – DOI: 10.3141/2292–12.
20. Winston R.J., Al-Rubaei A.M., Blecken G.T. [et al.] Maintenance measures for preservation and recovery of permeable pavement surface infiltration rate – the effects of street sweeping, vacuum cleaning, high pressure washing, and milling // Journal of Environmental Management. – 2016. – T. 169. – P. 132–144. – DOI: 10.1016/j.jenvman.2015.12.026.
21. Zhao J., Wang Z., Wang Y., Jiang H. Novel backwashing maintenance method for permeable concrete pavement: two-year field study // Journal of Irrigation and Drainage Engineering. – 2020. – T. 146, № 4. – Art. 04020003. – DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943–4774.0001456.
22. Zheng Z., Shi B. McCarthy D. [et al.] Organic micropollutant removal in stormwater: a review of treatment performance // Environmental Science: Water Research & Technology. – 2025. – T. 11, № 10. – P. 2274–2294. – DOI: 10.1039/D5EW00306G.

References

1. [On 10 May, more than half of the average monthly precipitation fell in Tashkent] [Электронный ресурс]. // Kun.uz. – 2026. – URL: https://www.kun.uz/ru/news/2026/05/11/10-maya-v-tashkente-vypalo-boleye-poloviny-srednemesyachnoy-normy-osadkov (accessed: 24.10.2026). (In Russ.).

2. [On additional measures for the socio-economic development of the city of Tashkent in 2026–2027]. Resolution of the President of the Republic of Uzbekistan No. PP-279 of 27.07 [Электронный ресурс]. // Resolution of the President of the Republic of Uzbekistan No. PP-279 of 27.07.2026. – URL: https://lex.uz/ru/docs/8370133 (accessed: 24.10.2026). (In Russ.).
3. Abdukadirova M.N., Kosimova Kh.A. [Multilayer permeable pavement]. Patent UZ IAP 8682 Republic of Uzbekistan, IPC E01C 11/00, C02F 1/28. Application No. IAP 20260324, filed 22.04.2026, published 28.08.2026, Bull. No. 8(304). (In Uzbek and Russ.).
4. [The Government of Uzbekistan approved the general plan of Tashkent until 2045] [Электронный ресурс]. // Fergana.agency. – 2024. – URL: https://fergana.agency/news/136124/ (accessed: 24.10.2026). (In Russ.).
5. Al-Amin A., McKenzie E.R. Dolomite dissolution, pH neutralization, and potentially toxic element immobilization in stormwater bioretention beds // Science of the Total Environment. – 2025. – Vol. 961. – Art. 178369. – DOI: 10.1016/j.scitotenv.2025.178369.
6. Ayers R.S., Westcot D.W. Water quality for agriculture. FAO Irrigation and Drainage Paper 29, Rev. 1. – Rome: FAO, 1985. – 174 P.
7. Drake J., Bradford A. Assessing the potential for restoration of surface permeability for permeable pavements through maintenance // Water Science and Technology. – 1958. – Vol. 68, No. 9. – P. 1950–1958. – DOI: 10.2166/wst.2013.450.
8. Drake J.A.P., Bradford A., Marsalek J. Review of environmental performance of permeable pavement systems: state of the knowledge // Water Quality Research Journal of Canada. – 2013. – Vol. 48, No. 3. – P. 203–222. – DOI: 10.2166/wqrjc.2013.055.
9. Franco E., Ghisi E., Vaz I.C.M., Thives L.P. Permeable pavements: an integrative review of technical and environmental contributions to sustainable cities // Water. – 2025. – Vol. 17, No. 22. – Art. 3323. – DOI: 10.3390/w17223323.
10. Henderson V., Tighe S.L. Evaluation of pervious concrete pavement permeability renewal maintenance methods at field sites in Canada // Canadian Journal of Civil Engineering. – 2011. – Vol. 38, No. 12. – P. 1404–1413. – DOI: 10.1139/l11-105.
11. Imran H.M., Akib S., Karim M.R. Permeable pavement and stormwater management systems: a review // Environmental Technology. – 2013. – Vol. 34, No. 18. – P. 2649–2656. – DOI: 10.1080/09593330.2013.782573.
12. Kuruppu U., Rahman A. Evaluation of permeable pavement systems for removing heavy metals from stormwater // Water. – 2023. – Vol. 15, No. 8. – Art. 1573. – DOI: 10.3390/w15081573.
13. Kuruppu U., Rahman A., Rahman M.A. Permeable pavement as a stormwater best management practice: a review and discussion // Environmental Earth Sciences. – 2019. – Vol. 78, No. 10. – Art. 327. – DOI: 10.1007/s12665-019-8312-2.
14. Pitcher S.K., Slade R.C.T., Ward N.I. Heavy metal removal from motorway stormwater using zeolites // Science of the Total Environment. – 2004. – Vol. 334. – P. 161–166. – DOI: 10.1016/j.scitotenv.2004.04.035.

15. Razzaghmanesh M., Beecham S. A review of permeable pavement clogging investigations and recommended maintenance regimes // Water. – 2018. – Vol. 10, No. 3. – Art. 337. – P. 1–9. – DOI: 10.3390/w10030337.
16. Scholz M., Grabowiecki P. Review of permeable pavement systems // Building and Environment. – 2007. – Vol. 42, No. 11. – P. 3830–3836. – DOI: 10.1016/j.buildenv. 2006.11.016.
17. Sounthararajah D.P., Loganathan P., Kandasamy J., Vigneswaran S. Removing heavy metals using permeable pavement system with a titanate nano-fibrous adsorbent column as a post treatment // Chemosphere. – 2017. – Vol. 168. – P. 467–473. – DOI: 10.1016/j.chemosphere. 2016.11.045.
18. Sun Y., Jian M., Cheng Y. et al. Understanding the removal of heavy metals from stormwater runoff in permeable pavement system // Science of the Total Environment. – 2024. – Vol. 930. – Art. 172642. – DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.172642.
19. Suozzo M., Dewoolkar M.M. Long-term field monitoring and evaluation of maintenance practices for pervious concrete pavement in Vermont // Transportation Research Record. – 2012. – Vol. 2292. – P. 94–103. – DOI: 10.3141/2292–12.
20. Winston R.J., Al-Rubaei A.M., Blecken G.T. [et al.] Maintenance measures for preservation and recovery of permeable pavement surface infiltration rate – the effects of street sweeping, vacuum cleaning, high pressure washing, and milling // Journal of Environmental Management. – 2016. – Vol. 169. – P. 132–144. – DOI: 10.1016/j.jenvman.2015.12.026.
21. 21 Zhao J., Wang Z., Wang Y., Jiang H. Novel backwashing maintenance method for permeable concrete pavement: two-year field study // Journal of Irrigation and Drainage Engineering. – 2020. – Vol. 146, No. 4. – Art. 04020003. – DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943–4774.0001456.
22. Zheng Z., Shi B. McCarthy D. [et al.] Organic micropollutant removal in stormwater: a review of treatment performance // Environmental Science: Water Research & Technology. – 2025. – Vol. 11, No. 10. – P. 2274–2294. – DOI: 10.1039/D5EW00306G.

Статья поступила в редакцию: 09.10.2026
Статья принята к публикации: 18.10.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 614.8:613.65

Солнечный и тепловой удар: причины, симптомы, профилактика и первая помощь

Мамадалиев Адхамжон Тухтамирзаевич
доц.
Наманганский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Наманган
E-mail: adhamjon6300@gmail.com

Мамаджанов Зокиржон Нематжанович
доц.
Наманганский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Наманган

Sunstroke and heatstroke: causes, symptoms, prevention, and first aid

Mamadaliev Adkhamjon Tukhtamirzaevich
Associate ProfessorNamangan State Technical University
Republic of Uzbekistan, Namangan

Mamadzhanov Zokirjon Nematjanovich
Associate ProfessorNamangan State Technical University
Republic of Uzbekistan, Namangan

Аннотация

В статье рассматриваются причины возникновения солнечного и теплового удара, основные факторы риска, клинические проявления, методы профилактики и принципы оказания первой помощи при перегревании организма. Особое внимание уделяется воздействию высокой температуры окружающей среды и солнечного излучения на здоровье работников промышленных предприятий, строительных площадок, открытых производственных участков и других объектов, где трудовая деятельность сопровождается значительными физическими нагрузками и повышенной тепловой нагрузкой. Раскрывается значение раннего выявления признаков теплового поражения, включая выраженную слабость, головокружение, головную боль, тошноту, спутанность сознания и другие опасные симптомы. Рассматриваются организационные и профилактические меры, направленные на снижение риска перегревания: постепенная акклиматизация работников, рациональное чередование труда и отдыха, обеспечение достаточного количества питьевой воды, организация перерывов в прохладных помещениях или затенённых местах, а также

Библиографическое описание: Мамадалиев А.Т., Мамаджанов З.Н. Солнечный и тепловой удар: причины, симптомы, профилактика и первая помощь // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23584

использование подходящей рабочей одежды. Отдельно подчёркивается необходимость своевременного распознавания теплового удара как состояния, требующего неотложной медицинской помощи. Представлен практический алгоритм действий при подозрении на тепловой удар, включающий вызов экстренной медицинской помощи, перемещение пострадавшего в прохладное место, снятие излишней одежды и максимально быстрое охлаждение организма. Материалы статьи могут быть использованы при проведении инструктажей по охране труда, разработке профилактических мероприятий и обучении работников правилам безопасного поведения в условиях повышенной температуры окружающей среды.

Abstract

The article examines the causes of sunstroke and heatstroke, major risk factors, clinical manifestations, preventive measures, and the principles of first aid for heat-related illness. Particular attention is given to the effects of high ambient temperatures and solar radiation on workers in industrial enterprises, construction sites, outdoor work areas, and other workplaces where strenuous physical activity increases the risk of excessive body heating. The importance of early recognition of heat-related illness is discussed, including warning signs such as severe weakness, dizziness, headache, nausea, confusion, and other potentially dangerous symptoms. Organizational and preventive measures for reducing heat-related risks are considered, including gradual acclimatization to hot conditions, appropriate work-rest schedules, access to sufficient drinking water, regular breaks in cool or shaded areas, and suitable work clothing. The article also emphasizes that suspected heatstroke must be treated as a medical emergency requiring immediate action. A practical response algorithm is presented, including contacting emergency medical services, moving the affected person to a cool location, removing unnecessary clothing, and initiating rapid body cooling. The proposed recommendations may be used in occupational safety briefings, the development of workplace heat-prevention programs, and training activities aimed at improving workers' awareness of heat-related hazards. The article highlights the importance of coordinated preventive, organizational, and emergency-response measures in protecting workers' health and reducing the consequences of exposure to excessive heat in occupational settings.

Ключевые слова: солнечный удар, тепловой удар, тепловой стресс, акклиматизация, профилактика, первая помощь, охрана труда.

Keywords: sunstroke, heatstroke, heat stress, acclimatization, prevention, first aid, occupational safety.

Введение

Высокая температура окружающей среды и солнечное излучение создают значительную физиологическую нагрузку на организм человека. Особенно повышается риск теплового стресса у работников, занятых на открытом воздухе, в производственных цехах с высокой температурой, на строительных площадках, а также при выполнении тяжелых физических работ. Согласно данным Всемирной организации здравоохранения, тепловой стресс на рабочем месте связан с накоплением тепла в организме в результате совместного

воздействия метаболического тепла, факторов окружающей среды, одежды и средств индивидуальной защиты и может приводить к слабости, патологическим состояниям, а в тяжелых случаях – к летальному исходу [1–3, 9, 10].

Тепловой стресс представляет опасность не только для работников, занятых на открытом воздухе. Недостаточная вентиляция закрытых производственных помещений, наличие источников тепла в цехах, длительное использование специальной защитной одежды, препятствующей теплоотдаче, а также тяжелая физическая работа могут способствовать увеличению тепловой нагрузки на организм [2, 1, 9, 4].

В связи с этим при организации труда в условиях повышенной температуры необходимо уделять особое внимание не только обеспечению непрерывности технологического процесса, но и вопросам охраны жизни и здоровья работников. Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) и Всемирная метеорологическая организация (ВМО) подчеркивают необходимость комплексного применения организационных, инженерных и профилактических мер для снижения тепловых рисков на рабочих местах [10].

Материалы и методы

Основной целью исследования является анализ причин, факторов риска и основных признаков тепловых состояний, возникающих под воздействием высокой температуры и солнечного излучения, а также разработка практического алгоритма оказания первой помощи при тепловом ударе.

Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

- изучить воздействие теплового стресса на организм человека;
- определить основные причины солнечного и теплового удара;
- систематизировать факторы риска;
- охарактеризовать основные признаки теплового удара;
- определить профилактические мероприятия в производственных условиях;
- показать значение постепенной адаптации к жаркой среде - акклиматизации;
- разработать последовательность оказания первой помощи при тепловом ударе.

В исследовании использованы методы анализа, обобщения и систематизации научной литературы, а также рекомендаций международных организаций по вопросам теплового стресса и безопасности труда.

В качестве основных источников для анализа использованы рекомендации Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), Национального института безопасности и гигиены труда США (NIOSH), входящего в структуру Центров по контролю и профилактике заболеваний (CDC), а также других авторитетных организаций в области профилактики теплового стресса, акклиматизации и оказания первой помощи [4, 7, 9, 10].

Исследование не является экспериментальным и имеет научно-аналитическую и практическую направленность. Основной результат исследования заключается в систематизации практических рекомендаций, направленных на снижение рисков, связанных с воздействием жаркой среды на рабочих местах.

Результаты и обсуждение

Для поддержания температуры тела в определенных физиологических пределах организм человека использует такие механизмы терморегуляции, как потоотделение, теплоотдача через кожу и изменение кровообращения. При повышении температуры окружающей среды, увеличении влажности воздуха, снижении его движения или повышении физической нагрузки эффективность данных механизмов снижается [1, 4, 9].

Тепловой стресс – это состояние, связанное с избыточным накоплением тепла в организме в результате совокупного воздействия метаболического тепла, факторов окружающей среды, одежды и средств индивидуальной защиты. Он может вызывать различные состояния – от теплового истощения до опасного для жизни теплового удара [1,3, 9].

В практической деятельности термин «солнечный удар» часто используется для обозначения тепловых нарушений, связанных с длительным пребыванием под прямым воздействием солнечных лучей. Однако с медицинской точки зрения тепловой удар не ограничивается воздействием солнечного излучения: он может развиваться также вследствие высокой температуры окружающей среды, физического напряжения, высокой влажности и других тепловых факторов [2, 9].

Тепловой удар представляет собой тяжелое состояние, при котором происходит резкое нарушение механизмов терморегуляции организма и изменение функций центральной нервной системы, что требует экстренной медицинской помощи. NIOSH характеризует тепловой удар как наиболее тяжелую форму заболеваний, связанных с воздействием жары [9, 7].

При задержке лечения тепловой удар может привести к стойкой инвалидности или смерти. Поэтому при возникновении такого состояния крайне важно не терять время, немедленно начать охлаждение пострадавшего и вызвать экстренную медицинскую помощь [1, 7, 5].

Основные причины и факторы риска солнечного и теплового удара.

На развитие заболеваний, связанных с воздействием жары, одновременно могут влиять несколько факторов (таблица 1).

Таблица 1. Основные причины и факторы риска солнечного и теплового удара

№	Фактор риска теплового стресса	Воздействие на организм человека
1	Высокая температура воздуха	Приводит к повышению температуры тела и нарушению теплообмена.
2	Высокая относительная влажность воздуха	Затрудняет испарение пота и снижает способность организма к охлаждению.
3	Прямое солнечное излучение	Вызывает дополнительный нагрев тела и кожных покровов.
4	Недостаточная подвижность воздуха	Замедляет отдачу тепла во внешнюю среду и испарение пота.
5	Тяжелый физический труд	В результате мышечной деятельности в организме образуется дополнительное количество тепла.
6	Продолжительная работа без перерывов	Снижает возможность восстановления организма и усиливает накопление тепла.

№	Фактор риска теплового стресса	Воздействие на организм человека
7	Недостаточное потребление жидкости	Приводит к обезвоживанию и нарушению процессов потоотделения и теплоотдачи.
8	Отсутствие адаптации к жаркой среде	Ограничивает физиологическую способность организма приспосабливаться к высокой температуре.
9	Воздухонепроницаемая или теплоудерживающая одежда	Способствует накоплению тепла и влаги вокруг тела.
10	Длительное использование средств индивидуальной защиты	Может ограничивать теплоотдачу и воздухообмен.
11	Предшествующие заболевания, связанные с воздействием жары	Могут повышать риск при повторном воздействии высокой температуры.
12	Некоторые лекарственные препараты и индивидуальные физиологические особенности	Могут влиять на терморегуляцию, потоотделение или водный баланс организма.

По данным NIOSH, высокая температура и влажность, прямое солнечное воздействие, внутренние источники теплового излучения, недостаточная подвижность воздуха, обезвоживание, физическая нагрузка, использование средств индивидуальной защиты и недостаточная акклиматизация повышают риск заболеваний, связанных с воздействием жары [5–7].

Некоторые виды средств индивидуальной защиты и одежды могут ограничивать потоотделение и теплоотдачу организма, увеличивая тем самым тепловую нагрузку. Поэтому при работе в условиях высокой температуры необходимо учитывать не только соответствие средств защиты требованиям безопасности, но и их влияние на тепловую нагрузку на организм [1, 9].

В производственных условиях особое внимание необходимо уделять данным рискам при выполнении тяжелых физических работ, наличии высокотемпературных технологических процессов и источников теплового излучения.

Основные признаки солнечного и теплового удара. Своевременное выявление ранних признаков воздействия жары имеет важное значение для предупреждения тяжелых последствий.

При тепловом истощении могут наблюдаться следующие признаки: головная боль, головокружение, общая слабость, сильная жажда, повышенное потоотделение, тошнота, боли или судороги в мышцах, снижение работоспособности [1, 6].

При тепловом ударе могут возникать значительно более опасные признаки, в том числе спутанность сознания, изменения поведения, нарушение речи, потеря сознания, судороги, очень высокая температура тела, горячая кожа, уменьшение или, в некоторых случаях, выраженное потоотделение [6].

Тепловой удар является опасным для жизни состоянием, сопровождающимся серьезным нарушением функций центральной нервной системы [1].

Следует особо подчеркнуть, что для определения теплового удара неправильно ориентироваться только на сухость кожи. Обильное потоотделение также может наблюдаться при тепловом ударе. Одним из наиболее важных признаков тяжелого состояния является изменение психического состояния и уровня сознания [1].

Профилактика солнечного и теплового удара. Профилактика теплового стресса прежде всего начинается с правильной организации рабочего процесса.

Во-первых, тяжелые физические работы по возможности следует переносить на более прохладное время суток. В наиболее жаркий период целесообразно снижать физическую нагрузку либо чередовать периоды работы и отдыха [10, 4].

Во-вторых, для работников необходимо организовать прохладные и затененные места для отдыха. В закрытых производственных помещениях следует применять инженерные меры, включая вентиляцию, улучшение движения воздуха, экранирование или теплоизоляцию источников тепла.

В-третьих, в непосредственной близости от рабочих мест должна находиться питьевая вода, а работникам необходимо обеспечить возможность регулярного употребления жидкости. NIOSH рекомендует обеспечивать рабочие места достаточным количеством прохладной питьевой воды и стимулировать работников к регулярному употреблению жидкости [4].

В-четвертых, работников необходимо постепенно адаптировать к жаркой среде. NIOSH рекомендует постепенно увеличивать продолжительность воздействия жаркой среды в течение 7-14 дней для новых и вернувшихся к работе сотрудников [4].

Для новых работников рекомендации NIOSH предусматривают начало работы с нагрузкой, не превышающей 20 % обычной продолжительности работы в жаркой среде в первый день, с последующим постепенным увеличением воздействия в последующие дни. Для работников, ранее имевших опыт работы в условиях жары, применяется отдельный, более короткий график акклиматизации [4].

В-пятых, необходимо регулярно проводить инструктаж и учебные занятия для работников по вопросам признаков теплового стресса и правил оказания первой помощи.

В-шестых, на рабочих местах целесообразно использовать принцип «наблюдения за коллегой» (buddy system). В соответствии с этим принципом работники контролируют состояние друг друга и при появлении головокружения, спутанности сознания, выраженной слабости или других признаков ухудшения состояния незамедлительно сообщают руководителю или ответственному сотруднику [4, 5].

Рисунок 1. Солнечный и тепловой удар: причины, симптомы, профилактика и первая помощь

Первая помощь при тепловом ударе. Тепловой удар является неотложным медицинским состоянием. Поэтому основной целью первой помощи является максимально быстрое охлаждение организма до прибытия медицинской помощи и постоянное наблюдение за жизненно важными функциями пострадавшего [1,7].

Первая помощь осуществляется в следующей последовательности:

1. Вызвать экстренную медицинскую помощь. При подозрении на тепловой удар необходимо немедленно вызвать экстренную медицинскую помощь. Не следует ждать прибытия медицинских работников, прежде чем начать охлаждение пострадавшего.

2. Удалить пострадавшего из жаркой среды. Необходимо переместить его в затененное, прохладное помещение или, по возможности, в помещение с кондиционированием воздуха.

3. Ослабить или снять лишнюю одежду. Это способствует улучшению теплоотдачи организма.

4. Начать быстрое охлаждение. Для этого могут использоваться прохладная или холодная вода, влажная ткань или полотенце, пакеты со льдом, вентилятор, а при возможности – ванна с холодной водой. NIOSH рекомендует, если это возможно, использовать холодную воду или ванну с холодной водой, а также смачивать кожу, прикладывать холодные влажные ткани и обеспечивать движение воздуха.

ВОЗ также рекомендует при тепловом ударе проводить быстрое и активное охлаждение, включая перемещение пострадавшего в затененное или кондиционируемое помещение, использование холодных влажных тканей, пакетов со льдом и вентилятора [7].

5. Контролировать сознание и дыхание.Пострадавшего нельзя оставлять одного. Необходимо регулярно контролировать уровень сознания и дыхание. Лицо без сознания следует расположить в безопасном положении и наблюдать за ним до прибытия экстренной медицинской помощи.

6. Не давать жидкость человеку с нарушенным сознанием.Давать воду или другие напитки человеку со спутанным сознанием или нарушением глотания может быть опасно. Прием жидкости может рассматриваться только у человека, находящегося в сознании и способного безопасно глотать.

7. При отсутствии нормального дыхания начать реанимационные мероприятия. Если пострадавший не дышит нормально, необходимо начать сердечно-легочную реанимацию в соответствии с действующими протоколами оказания первой помощи и СЛР.

ВОЗ не рекомендует давать аспирин или парацетамол при тепловом ударе [5].

Ошибки при оказании первой помощи. При тепловом ударе необходимо избегать следующих ошибок:

- задержки вызова экстренной медицинской помощи;
- оставления пострадавшего в жарком помещении или на открытом солнце;
- позднего начала охлаждения;
- ограничения помощи только наложением влажной ткани на лоб;
- дачи воды человеку со спутанным сознанием;
- оставления пострадавшего без наблюдения;
- ожидания только измерения температуры тела;
- применения лекарственных препаратов без рекомендации медицинского специалиста;
- ошибочной оценки теплового удара как обычной усталости.

Эффективность первой помощи во многом зависит от того, насколько быстро начато охлаждение организма. Поэтому до прибытия медицинской помощи важно как можно раньше начать безопасные и эффективные мероприятия по охлаждению пострадавшего [7].

Научная новизна исследования. Научная новизна исследования заключается в систематизации в единую практическую систему факторов риска, связанных с работой в жаркой среде, основных признаков теплового стресса, профилактических мероприятий и методов оказания первой помощи.

В результате исследования практически обоснована следующая последовательность оказания первой помощи при тепловом ударе:

«вызов экстренной медицинской помощи → удаление из жаркой среды → быстрое охлаждение → контроль жизненно важных функций → при необходимости начало реанимационных мероприятий».

Кроме того, показана необходимость комплексного применения организационных мер для снижения тепловых рисков в производственных условиях: изменения режима труда, организации прохладных мест для отдыха, обеспечения питьевой водой, обучения работников и постепенной акклиматизации, а не только использования средств индивидуальной защиты [1, 10].

ВОЗ и ВМО подчеркивают важность разработки программ профессиональной безопасности при воздействии жары на рабочих местах, оценки рисков и применения адаптированных профилактических мероприятий [10].

Результаты исследования могут быть использованы в следующих направлениях:

- при разработке инструкций по охране труда на промышленных предприятиях;

- при организации работ на открытом воздухе в летний период;

- при установлении режима труда и отдыха на строительных площадках;
- при улучшении условий труда в производственных цехах с высокой температурой;
- при обучении работников вопросам теплового стресса и оказания первой помощи;
- при проведении учебных занятий по охране труда;
- при преподавании дисциплин «Безопасность жизнедеятельности» и «Охрана труда»;
- при организации мероприятий по подготовке предприятий к чрезвычайным ситуациям.

Данные рекомендации имеют особое практическое значение для работников, занятых на открытом воздухе в летний период, строителей, дорожно-ремонтных бригад, работников сельского хозяйства, а также работников производственных цехов с высокой температурой.

Заключение

Высокая температура, солнечное излучение, повышенная влажность, тяжелый физический труд, обезвоживание и недостаточная адаптация к жаркой среде могут способствовать развитию теплового стресса в организме человека.

Для профилактики теплового стресса большое значение имеют правильная организация рабочего процесса, рациональное распределение времени работы и отдыха, использование прохладных и затененных мест, обеспечение достаточным количеством жидкости, применение соответствующей одежды, обучение работников и постепенная адаптация к жаркой среде. Согласно рекомендациям NIOSH, акклиматизация новых работников к условиям повышенной температуры должна осуществляться постепенно в течение 7-14 дней.

Тепловой удар представляет собой не обычную усталость, а опасное для жизни состояние, требующее экстренной медицинской помощи. В такой ситуации наиболее важными мероприятиями являются немедленный вызов экстренной медицинской помощи и как можно более быстрое начало охлаждения организма.

Таким образом, снижение тепловых рисков на промышленных предприятиях является не только медицинской задачей, но и комплексной задачей, непосредственно связанной с охраной труда, производственной безопасностью, организацией рабочего процесса и обучением работников.

Список литературы

1. Бахриддинов, Н.С. Безопасность жизнедеятельности (экология, защита от чрезвычайных ситуаций, безопасность жизнедеятельности): учебник / Н.С. Бахриддинов, А.Т. Мамадалиев, З.Н. Мамаджанов. – Наманган: Muhandis-noshir, 2026. – 600 с.
2. Комитет промышленной, радиационной и ядерной безопасности при Кабинете Министров Республики Узбекистан. Охрана труда и промышленная безопасность – важный фактор предупреждения аварий и несчастных случаев: [сайт]. – 28 апреля(адрес страницы не указан). – 2026.
3. Разиков, Р.С. Охрана труда и техника безопасности / Р.С. Разиков. – Ташкент: Fidokor yosh avlod, 2021. – 160 с.

4. Centers for Disease Control and Prevention; National Institute for Occupational Safety and Health. Workplace recommendations: heat stress: [сайт]. – 16 июля(адрес страницы не указан). – 2026.
5. Heat and health of occupational workers: a short summary of literature // Journal of Occupational Health. – 2024. – Т. 66, № 1. – DOI: 10.1093/joccuh/uiae018.
6. Impact of climate change and heat stress on workers' health and productivity: a scoping review // The Journal of Climate Change and Health. – 2023. – Т. 12. – Art. 100249. – DOI: 10.1016/j.joclim.2023.100249.
7. Khorshid, S. Exploring intervention strategies to prevent occupational heat stress: a scoping review / S. Khorshid, S. Song // Safety and Health at Work. – 2025. – Т. 16, № 2. – P. 134–144. – DOI: 10.1016/j.shaw.2025.03.005.
8. World Health Organization. Workplace heat stress: questions and answers: [сайт]. – 22 августа(placeholder – вставьте ссылку). – T texte: электронный. – 2025.
9. World Health Organization; World Meteorological Organization. Climate change and workplace heat stress: technical report and guidance / World Health Organization; World Texte: электронный. – Geneva: WHO, 2025. – 85 P.
10. World Health Organization. Heatwaves: how to stay cool. Questions and answers: [сайт] [Электронный ресурс]. URL: https://yandex.ru/search/?text=World+Health+Organization.+Heatwaves%3A+how+to+stay+cool.+Questions+and+answers&lr=64 (дата обращения: 01.11.2026).

References

1. Bakhriddinov N.S., Mamadaliev A.T., Mamadzhanov Z.N. [Life Safety (Ecology, Protection from Emergency Situations, Life Safety). Textbook]. – Namangan: «Muhandis-noshir», 2026. – 600 s (In Russ.).
2. Komitet promyshlennoj, radiatsionnoj i yadernoj bezopasnosti pri Kabinete Ministrov Respubliki Uzbekistan. [Occupational Safety and Industrial Safety – an Important Factor in Preventing Accidents and Injuries]. – 28 aprelya. – Komitet promyshlennoj, radiatsionnoj i yadernoj bezopasnosti pri Kabinete Ministrov Respubliki Uzbekistan, 2026. (In Russ.).
3. Razikov R.S. [Occupational Safety and Safety Engineering]. – Tashkent: Fidokor yosh avlod, 2021. – 160 s (In Russ.).
4. Centers for Disease Control and Prevention; National Institute for Occupational Safety and Health. Workplace Recommendations: Heat Stress. – 16 July. – 2026.
5. Heat and health of occupational workers: a short summary of literature // Journal of Occupational Health. – 2024. – Vol. 66, No. 1. – DOI: 10.1093/joccuh/uiae018.
6. Impact of climate change and heat stress on workers’ health and productivity: a scoping review // The Journal of Climate Change and Health. – 2023. – Vol. 12. – Art. 100249. – DOI: 10.1016/j.joclim.2023.100249.

7. Khorshid S., Song S. Exploring Intervention Strategies to Prevent Occupational Heat Stress: A Scoping Review // Safety and Health at Work. – 2025. – Vol. 16, No. 2. – P. 134–144. – DOI: 10.1016/j.shaw.2025.03.005.
8. World Health Organization. Workplace heat stress: Questions and answers. – 22 August. – World Health Organization. – 2025.
9. World Health Organization; World Meteorological Organization. World Health Organization; World Meteorological Organization. Climate change and workplace heat stress: technical report and guidance. – Geneva: World Health Organization, 2025. – 85 P.
10. World Health Organization. World Health Organization. Heatwaves: How to stay cool. Questions and answers. – World Health Organization. – World Health Organization.

Статья поступила в редакцию: 01.11.2026
Статья принята к публикации: 09.11.2026
Статья опубликована: 28.11.2026

УДК 614.8:681.518.5

DOI: 10.32743/UniTech.2026.152.11.23714

Методический подход к интегральной оценке технологического риска и архитектура адаптивного раннего оповещения для горно-металлургического предприятия

Уткирова Махлиё Рухиддиновна
докторант
Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: mahliyophd94@gmail.com

Methodological approach to integral technological risk assessment and an adaptive early-warning architecture for a mining and metallurgical enterprise

Utkirova Makhliyo Ruhiddinovna
PhD student
Tashkent State Technical University named after Islam Karimov
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

Цель исследования — разработка методического подхода к интегральной оценке технологического риска и архитектуры адаптивного раннего оповещения для многопрофильного горно-металлургического предприятия. Предложенная модель объединяет нормализацию разнородных сенсорных данных, оценку скорости изменения параметров, гибридное взвешивание и учет надежности измерительных каналов. Для преобразования расчетного индекса в практическое решение используется пятиуровневая классификация риска, учитывающая доминирующий тип опасности, производственную зону, фоновый шум, доступность каналов связи и подтверждение получения сообщения (ACK). Для методической апробации заданы демонстрационные веса каналов и выполнены расчеты трех сценариев: нормального режима, развивающегося риска и критической комбинации. Полученные значения скорректированного индекса R* составили соответственно 0,086; 0,455 и 0,892, что соответствует уровням I, III и V. В вычислительном эксперименте Monte Carlo с 1000 повторениями и случайными возмущениями нормированных параметров стандартное отклонение индекса составило около 0,014, а принадлежность к исходному классу сохранилась во всех трех сценариях. Показано также, что отказ отдельного сенсорного канала должен обрабатываться как degraded/fail-safe состояние, а не как признак

Библиографическое описание: Уткирова М.Р. Методический подход к интегральной оценке технологического риска и архитектура адаптивного раннего оповещения для горно-металлургического предприятия // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23714

безопасности. Практический результат работы состоит в формировании воспроизводимой схемы дальнейшей лабораторной и промышленной валидации, включающей калибровку датчиков, оценку погрешности, многоканальное оповещение, резервирование и регистрацию ACK.

Abstract

The study develops a methodological approach to integral technological-risk assessment and an adaptive early-warning architecture for a multi-process mining and metallurgical enterprise. The proposed model combines normalization of heterogeneous sensor data, parameter rate-of-change assessment, hybrid weighting, and measurement-channel reliability. A five-level risk classification converts the calculated index into an actionable warning decision while accounting for the dominant hazard type, production zone, background noise, communication-channel availability, and acknowledgement of message receipt (ACK). For methodological verification, demonstrational channel weights were specified and three scenarios were calculated: normal operation, developing risk, and a critical combined hazard. The corrected integral-risk index R* was 0.086, 0.455, and 0.892, corresponding to levels I, III, and V, respectively. A Monte Carlo computational experiment with 1000 repetitions and random perturbations of normalized inputs produced an index standard deviation of approximately 0.014, while all three scenarios retained their initial risk class. A separate sensor-channel failure case demonstrated that missing data must trigger a degraded/fail-safe state rather than be interpreted as safety. The practical outcome is a reproducible framework for subsequent laboratory and industrial validation, including sensor calibration, error estimation, multichannel warning delivery, redundancy, and ACK logging.

Ключевые слова: промышленная безопасность, интегральный риск, раннее предупреждение, сенсорный мониторинг, динамический тренд, адаптивное оповещение, SCADA/DCS.

Keywords: industrial safety, integral risk, early warning, sensor monitoring, dynamic trend, adaptive notification, SCADA/DCS.

Введение

Современные горно-металлургические предприятия объединяют процессы, связанные с высокими температурами и давлениями, горючими и токсичными газами, расплавленным металлом, электрическими и механическими нагрузками. В таких условиях аварийное состояние нередко формируется не как мгновенное превышение одного порога, а как последовательное изменение нескольких взаимосвязанных параметров. Поэтому практическая задача раннего предупреждения должна включать не только фиксацию предельного значения, но и анализ динамики, качества данных, пространственного контекста и надежности доведения сообщения до персонала. Такой подход соответствует общей логике снижения риска бедствий и развития систем раннего предупреждения [10].

В международной практике управление рисками рассматривается как последовательность идентификации, анализа, оценки, мониторинга и коммуникации [1, 4]. В процессных производствах требования к управлению сигнализацией предполагают рационализацию, приоритизацию, регистрацию событий и поддержку корректного действия

оператора [3]. Современные исследования IIoT и промышленных временных рядов показывают эффективность потокового обнаружения аномалий, мультимодального объединения сенсорных данных и адаптивной обработки изменяющихся режимов [11–14]. Для горных производств актуальны многоиндикаторные методы раннего предупреждения, учитывающие качество данных, временную динамику и межканальные зависимости [15, 16]. Для аварийного звукового оповещения существенны зонирование, слышимость и разборчивость сообщения [2, 5, 6]. В совокупности эти положения требуют объединения сенсорного мониторинга, аналитики риска и многоканального оповещения в единый замкнутый контур.

Цель исследования — разработать и методически апробировать модель интегральной оценки технологического риска и архитектуру адаптивного раннего оповещения, преобразующую поток разнородных сенсорных данных в устойчивое решение о классе опасности, содержании адресного сообщения и способе его доставки.

Материалы и методы

Объектом методической апробации выбран Центральный ремонтно-механический завод АО «Алмалыкский горно-металлургический комбинат». Для экспериментального зонирования используются условные зоны A–D, позволяющие моделировать различные сочетания термических, газохимических, барометрических, электрических и пожарных факторов без отождествления этих обозначений с официальными наименованиями цехов. Информационная цепочка исследования имеет вид: «сенсорные данные → контроль качества → оценка локального риска → интегральный индекс → класс опасности → адресное сообщение → канал доставки → ACK и повторная оценка».

Для j-й зоны в момент времени t исходный вектор мониторинга задается как $X_j(t)=[G_j(t), T_j(t), P_j(t), S_j(t), V_j(t), N_j(t)]^T$, где G — концентрация газа; T — температура; P — давление; S — признак дыма/пламени; V — вибрация; N — фоновый шум. Параметры G, T, P, S и V характеризуют технологическую опасность, а N преимущественно используется для выбора режима оповещения.

Поскольку измерительные каналы имеют разные единицы и физический смысл, их значения приводятся к общей шкале [0;1]. Для параметра, риск которого монотонно растет с увеличением значения, применяется кусочно-линейная нормализация:

$$r_i(t)=0 \text{ при } x_i\le N_i;\ r_i(t)=(x_i-N_i)/(C_i-N_i) \text{ при } N_i<x_i<C_i;\ r_i(t)=1 \text{ при } x_i\ge C_i.$$

Для величин с рабочим безопасным диапазоном $[L_i;U_i]$, например давления, учитываются как верхние, так и нижние отклонения. Конкретные N_i, L_i, U_i и критические значения должны определяться по технологическим регламентам, паспортам сенсоров и результатам калибровки, а не по демонстрационным значениям программного интерфейса.

Для раннего распознавания формирующейся опасности дополнительно используется скорость изменения параметра $v_i(t)=[x_i(t)-x_i(t-\Delta t)]/\Delta t$ и нормированный динамический коэффициент $q_i(t)=\min\{1,\ |v_i(t)|/v_{i,crit}\}$. Локальный показатель риска объединяет текущее состояние и тренд:

$$z_i(t)=\alpha_i\cdot r_i(t)+\beta_i\cdot q_i(t),\ \alpha_i+\beta_i=1.$$

Относительная значимость параметров задается весами w_i. В окончательной промышленной настройке они должны определяться гибридно: экспертная составляющая — по AHP, объективная — по вариативности или информационной энтропии данных [8, 9]. Для демонстрационного расчета в данной статье приняты веса wG=0,30; wT=0,25; wP=0,20; wS=0,15; wV=0,10 (Σw_i=1). Коэффициенты надежности каналов приняты равными aG=0,95; aT=0,98; aP=0,95; aS=1,00; aV=0,90. Для формирования локального показателя использовано соотношение α=0,70 и β=0,30. Эти значения предназначены исключительно для проверки вычислительной логики модели и не рассматриваются как нормативные коэффициенты для АО «Алмалыкский ГМК».

$$R^*_j(t) = [\Sigma\, a_i(t)\cdot w_i \cdot z_{ij}(t)] / [\Sigma\, a_i(t)\cdot w_i].$$

Последовательность вычисления интегрального индекса, включая контроль качества данных, нормализацию, динамический тренд, локальный риск, взвешивание и коррекцию по надежности сенсоров, представлена на рисунке 1.

Рисунок 1. Общая последовательность формирования интегрального индекса риска (разработка автора)

Аппаратная реализация экспериментального стенда

Для перехода от программной модели к воспроизводимому лабораторному стенду каждая экспериментальная зона рассматривается как автономный узел сбора данных. В качестве зонального контроллера предусмотрен ESP32 DevKit V1, выполняющий опрос сенсоров и передачу телеметрии по Wi-Fi с использованием MQTT. Автономность узлов A–D позволяет сохранить сбор данных в остальных зонах при отказе одного контроллера. Для аналоговых каналов может применяться внешний 16-битный АЦП ADS1115, повышающий разрешение измерения и позволяющий унифицировать подключение аналоговых преобразователей. Состав аппаратного стенда показан на рисунке 2, а функциональное назначение его компонентов приведено в таблице 1.

Газовый канал формируется датчиками MQ-4/MQ-7, температурный — герметичным цифровым зондом DS18B20, барометрический — датчиком XGZP6847, а признак открытого пламени — инфракрасным модулем YG1006. В качестве исполнительного канала локального оповещения используется комбинация сирены и стробоскопического маяка. Рабочие пороги в эксперименте задаются как параметры сценария и после пилотной проверки должны быть согласованы с технологическими регламентами, паспортами средств измерений и требованиями промышленной безопасности; поэтому демонстрационные значения не рассматриваются как нормативные аварийные границы.

Рисунок 2. Основные аппаратные модули экспериментального стенда (составлено автором)

Таблица 1. Функциональное назначение аппаратных компонентов экспериментального стенда

Компонент	Назначение	Роль в алгоритме
ESP32 DevKit V1	зональный контроллер	сбор телеметрии, Wi-Fi/MQTT
ADS1115	16-битный АЦП	оцифровка аналоговых каналов
MQ-4 / MQ-7	газовая среда	контроль CH_4/CO в выбранных сценариях
DS18B20	температура	контроль T и динамики dT/dt
XGZP6847	давление	контроль P и отклонения от рабочего диапазона
YG1006	ИК-признак пламени	быстрое распознавание открытого пламени
Сирена + строб	исполнительный канал	локальное звуковое и визуальное оповещение

Классификация риска и логика адаптивного оповещения

Расчетный индекс $R_j(t)$ преобразуется в пять рабочих уровней: I — норма (0,00–0,20), II — внимание (0,20–0,40), III — предупреждение (0,40–0,60), IV — высокий риск (0,60–0,80), V — критический (0,80–1,00). Рабочая классификация и соответствующая реакция системы приведены в таблице 2. Равномерное деление нормированного диапазона [0;1] используется в настоящей статье как демонстрационная шкала для проверки логики переходов между пятью состояниями. Эти интервалы не интерпретируются как нормативные аварийные границы предприятия; при пилотной валидации они должны уточняться по технологическим регламентам, экспертной разметке и анализу классификационных характеристик (например, ROC/Youden) на фактических данных.

Таблица 2. Рабочая классификация интегрального индекса и реакция системы

Уровень	R(t)	Реакция системы
I — Норма	0,00–0,20	Мониторинг, регистрация события
II — Внимание	0,20–0,40	Усиленный контроль тренда; информация оператору

Уровень	R(t)	Реакция системы
III — Предупреждение	0,40–0,60	Адресное голосовое/визуальное сообщение; подтверждение состояния
IV — Высокий риск	0,60–0,80	Многоканальное оповещение; подготовка защитных действий
V — Критический	0,80–1,00	Срочное сообщение; все доступные каналы, резерв и ACK

Чтобы исключить частое переключение состояний около границы классов, предусмотрены разные пороги повышения и понижения уровня опасности и минимальное время удержания условия (гистерезис и dwell-time). Такой механизм отделяет устойчивую тенденцию от короткого импульса или шумового выброса сенсора.

Для формирования предупреждения состояние зоны представляется расширенным вектором $S_j(t)=[R_j(t), \dot{R}_j(t), H_j(t), C_j(t), Z_j, O_j(t), N_j(t), A_k(t), ACK_j(t)]^T$. Здесь $\dot{R}_j(t)$ — тренд интегрального индекса; $H_j(t)$ — доминирующий тип опасности; $C_j(t)$ — надежность данных; Z_j — зона; $O_j(t)$ — целевая группа; $N_j(t)$ — шум; $A_k(t)$ — доступность k-го канала; $ACK_j(t)$ — подтверждение получения сообщения. Доминирующий вид опасности определяется по наибольшему взвешенному вкладу соответствующего параметра, а при одновременных событиях формируется индекс приоритета, учитывающий уровень риска, скорость его роста, тяжесть сценария, значимость зоны и качество данных.

Алгоритм не ограничивается включением сирены. Для III–V уровней сообщение формируется по заранее утвержденному шаблону: тип опасности, зона, требуемое действие и при необходимости безопасное направление движения. В зависимости от производственного контекста задействуются голосовой, световой, мобильный/цифровой и операторский HMI-каналы. При высоком шуме акустический канал дополняется обязательной визуальной индикацией и цифровым каналом. При отказе одного канала выполняется автоматический переход на доступный резерв.

Ключевым элементом замкнутого контура является ACK. Факт отправки сообщения не считается эквивалентом его получения. Если подтверждение отсутствует дольше установленного времени, интегральный риск продолжает расти или состояние переходит к IV–V уровню, запускаются повторная передача, резервный канал и эскалация. Подход соответствует логике отказоустойчивой OT-архитектуры, где отказ отдельного сенсора, сервера или канала не должен приводить к полной потере функции безопасности [7].

Для проверки вычислительной устойчивости модели, помимо последующей экспериментальной валидации по MAE, RMSE, Accuracy, Precision, Recall, F1, Tdet, Tmsg, Tlead, P_delivery, P_ACK и T_channel, в настоящей работе выполнен демонстрационный анализ чувствительности методом Monte Carlo. Для каждого из трех расчетных сценариев проведено 1000 повторений; к нормированным локальным показателям z_i добавлялось независимое гауссово возмущение $\sigma z=0,03$, а к коэффициентам надежности — $\sigma a=0,01$ с ограничением результатов диапазоном [0;1]. Такой вычислительный эксперимент не заменяет стендовую или промышленную валидацию, но позволяет оценить устойчивость присвоения класса к небольшим входным возмущениям.

Сценарии вычислительно-экспериментальной проверки

Для воспроизводимой проверки алгоритма набор испытаний должен включать не только опасные, но и нормальные состояния, а также контролируемые отказы. Эталонный класс каждого прогона задается до начала эксперимента, после чего фактический R(t), момент перехода между уровнями, сформированное сообщение, выбранные каналы и ACK сопоставляются с ожидаемой реакцией. Базовые сценарии проверки приведены в таблице 3.

Таблица 3. Базовые сценарии проверки адаптивного алгоритма

Код	Сценарий	Входное условие	Ожидаемая реакция
S1	Нормальный режим	R низкий, тренд устойчив	нет тревоги; журналирование
S2	Медленно растущий риск	R ниже критического, $\dot{R}>0$	раннее предупреждение II/III уровня
S3	Быстро растущий риск	R и $\dot{R}$ высокие	ускоренная эскалация
S4	Высокий фоновый шум	N высокий	голос + обязательный визуальный/цифровой канал
S5	Отказ канала	$A_к=0$	автоматический переход на резерв
S6	Несколько зон	одновременно 2+ события	приоритизация по P_j и адресные сообщения
S7	ACK отсутствует	сообщение отправлено, подтверждения нет	retry, резервный канал, эскалация
S8	Отказ/плохое качество сенсора	quality=bad или разрыв канала	degraded/fail-safe, перерасчет по надежным данным

Такая организация эксперимента позволяет раздельно оценивать качество распознавания опасности и надежность коммуникационного контура. Например, корректно определенный высокий риск при несостоявшейся доставке сообщения не должен считаться полным успехом системы. Аналогично отсутствие тревоги при отказавшем сенсоре не должно интерпретироваться как безопасное состояние. Поэтому в протоколе каждого прогона фиксируются исходные значения, quality-флаги, расчетный индекс, уровень опасности, время формирования сообщения, канал, ACK и время реакции.

Калибровка измерительных каналов и оценка погрешности

Перед лабораторной валидацией для каждого измерительного канала предусматривается отдельная калибровочная запись. Для аналоговых каналов применяется линейная или паспортно-обоснованная аппроксимация $x_{cal}=k\cdot x_{raw}+b$, где коэффициенты k и b определяются по не менее чем трем опорным точкам в рабочем диапазоне. Для давления рекомендуется использовать точки около 10, 50 и 90 % диапазона измерения; для температуры — не менее трех устойчивых температурных уровней; для газовых каналов — нулевую/фоновую точку и не менее двух контрольных концентраций, задаваемых с помощью поверочной смеси или эталонного генератора. Для дискретного канала пламени фиксируются расстояние, угол и доля успешных срабатываний при повторениях.

В каждой опорной точке должно выполняться не менее 10 повторных измерений. Погрешность оценивается по среднему смещению, MAE и RMSE; разброс — по стандартному отклонению, а неопределенность среднего — по 95 %-ному доверительному интервалу. Значения, полученные при фактической калибровке, должны храниться вместе

с идентификатором сенсора и использоваться при последующей интерпретации R*(t). В настоящей работе численные калибровочные коэффициенты не подменяются расчетными значениями: они являются предметом следующего лабораторного этапа.

Результаты

Для демонстрационного расчета использованы три вектора локальных показателей z=[zG,zT,zP,zS,zV]: D1=[0,10; 0,12; 0,08; 0,00; 0,10] для нормального режима; D2=[0,60; 0,55; 0,40; 0,25; 0,20] для развивающегося риска; D3=[0,95; 0,90; 0,80; 1,00; 0,70] для критической комбинации. При указанных выше весах и коэффициентах надежности скорректированный индекс составил R*=0,086 для D1, R*=0,455 для D2 и R*=0,892 для D3. Соответственно система присвоила классы I, III и V и сформировала реакции от обычного мониторинга до задействования всех доступных каналов с АСК.

При моделировании отказа газового канала в сценарии D2 (aG=0) индекс по оставшимся достоверным каналам снизился до 0,394. Такое значение формально попадает во II уровень, однако алгоритм не интерпретирует его как снижение опасности: одновременно формируется технический quality/degraded-флаг, инициируется проверка сенсора и, при наличии, переход на резервный источник данных. Этот пример показывает необходимость совместного учета численного индекса и качества измерительной информации.

Результаты Monte Carlo анализа подтвердили вычислительную устойчивость трех демонстрационных сценариев. Средние значения R* составили 0,088; 0,455 и 0,890 при стандартном отклонении около 0,014. 95 %-ные интервалы составили соответственно 0,061–0,113; 0,427–0,484 и 0,864–0,915. Во всех 1000 повторениях каждого сценария итоговый класс риска совпал с исходным классом. Результаты приведены в таблице 4; они характеризуют устойчивость расчетной схемы к малым возмущениям, но не являются оценкой промышленной точности сенсоров или доказательством эффективности на реальном объекте.

Таблица 4. Демонстрационные результаты расчета и анализа чувствительности

Сценарий	R* ном.	Среднее R*	SD	95% интервал	Класс
D1 — нормальный	0,086	0,088	0,014	0,061–0,113	I
D2 — развивающийся риск	0,455	0,455	0,014	0,427–0,484	III
D3 — критическая комбинация	0,892	0,890	0,014	0,864–0,915	V

Обсуждение

Полученные демонстрационные результаты показывают, что предложенная схема согласованно переводит сочетание нормированных сенсорных признаков в дискретный класс риска и управленческую реакцию. Ее принципиальное отличие от простого порогового контроля состоит в совместном учете текущего состояния, динамического тренда и надежности каналов. Такой подход согласуется с современными работами по потоковому

обнаружению аномалий в IIoT [11], мультимодальному объединению промышленных сенсоров [12, 13] и адаптивному проектированию систем сигнализации при изменении статистических свойств процесса [14].

Для горных производств особенно важен переход от одиночного порога к анализу согласованной эволюции нескольких индикаторов. В современных исследованиях многоиндикаторного раннего предупреждения показано, что качество данных, шум, пропуски и временные зависимости непосредственно влияют на надежность предупреждения [15, 16]. В предлагаемой схеме это отражено через коэффициент $a_i(t)$, динамическую составляющую $q_i(t)$, гистерезис, dwell-time и degraded/fail-safe режим при потере канала.

Ограничение настоящей работы состоит в том, что приведенные веса, коэффициенты надежности и Monte Carlo результаты являются методической вычислительной апробацией, а не итоговой калибровкой оборудования на предприятии. Поэтому Accuracy, Recall, F1, фактическая вероятность доставки, время реакции и метрологические характеристики сенсоров не заявляются как достигнутые производственные показатели. Следующий этап должен включать трехточечную (или многоточечную) калибровку измерительных каналов, повторные стендовые прогоны, оценку MAE/RMSE и доверительных интервалов, а затем пилотную проверку на согласованных контрольных точках предприятия.

Заключение

Предложен методический подход, объединяющий разнородные сенсорные данные, их динамику и достоверность в едином интегральном индексе технологического риска. Для демонстрационной проверки заданы явные веса и коэффициенты надежности каналов. Расчет трех сценариев дал R*=0,086, 0,455 и 0,892, что соответствует уровням I, III и V. Monte Carlo анализ с 1000 повторениями показал стандартное отклонение индекса около 0,014 и сохранение исходного класса риска во всех демонстрационных прогонах.

Архитектура адаптивного оповещения связывает расчетный риск с практическим действием: учитывает качество данных, формирует адресное сообщение, выбирает голосовой, световой, мобильный и HMI-каналы, контролирует ACK и при необходимости выполняет повторную передачу, резервирование и эскалацию. Отказ отдельного сенсорного канала рассматривается как degraded/fail-safe состояние, а не как снижение риска. Для перехода от методической апробации к промышленной валидации необходимы фактическая калибровка датчиков, стендовые повторные измерения с оценкой MAE/RMSE и доверительных интервалов, а также пилотные испытания на согласованных контрольных точках предприятия.

Список литературы

1. IEC 31010:2019. Risk management – Risk assessment techniques: international standard. – Geneva: International Electrotechnical Commission, 2019. – 264 P.
2. IEC 60268-16:2020. Sound system equipment – Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index: international standard. – Geneva: International Electrotechnical Commission, 2020. – 219 P.

3. IEC 62682:2022. Management of alarm systems for the process industries: international standard. – Geneva: International Electrotechnical Commission, 2022. – 168 P.
4. ISO 31000:2018. Risk management – Guidelines: international standard. – Geneva: International Organization for Standardization, 2018. – 16 P.
5. ISO 7240–19:2007. Fire detection and alarm systems – Part 19: Design, installation, commissioning and service of sound systems for emergency purposes: international standard. – Geneva: International Organization for Standardization, 2007. – 33 P.
6. ISO 7731:2003. Ergonomics – Danger signals for public and work areas – Auditory danger signals: international standard. – Geneva: International Organization for Standardization, 2003. – 17 P.
7. National Institute of Standards and Technology. Guide to Operational Technology (OT) Security. NIST SP 800–82 Rev. 3. Gaithersburg, MD: NIST. – Gaithersburg, MD: NIST. – 2023. – DOI: 10.6028/NIST.SP.800-82r3.
8. Saaty T.L. The Analytic Hierarchy Process. – New York: McGraw-Hill, 1980.
9. Shannon C.E. A Mathematical Theory of Communication // Bell System Technical Journal. – 1948. – T. 27, № 3. – P. 379–423. – DOI: 10.1002/j.1538–7305.1948.tb01338.x.
10. Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030 / United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR). – Geneva: United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 2015. – 32 P.
11. Wang R., Qiu H., Cheng X., Liu X. Anomaly detection with a container-based stream processing framework for Industrial Internet of Things // Journal of Industrial Information Integration. – 2023. – T. 35. – Art. 100507. – DOI: 10.1016/j.jii.2023.100507.
12. Qu X., Liu Z., Wu C.Q., Hou A., Yin X., Chen Z. MFGAN: Multimodal Fusion for Industrial Anomaly Detection Using Attention-Based Autoencoder and Generative Adversarial Network // Sensors. – 2024. – T. 24, № 2. – Art. 637. – DOI: 10.3390/s24020637.
13. Liu J., Sha Y., Zhang W., Yan Y., Liu X. Anomaly Detection Method for Industrial Control System Operation Data Based on Time–Frequency Fusion Feature Attention Encoding // Sensors. – 2024. – T. 24, № 18. – Art. 6131. – DOI: 10.3390/s24186131.
14. Asaadi M., Aslansefat K., Izadi I., Yang F. Adaptive Design of Alarm Systems in Industrial Processes // IFAC-PapersOnLine. – 2024. – T. 58, № 14. – P. 841–846. – DOI: 10.1016/j.ifacol. 2024.08.442.
15. Liu C., Wang E., Li Z., Liu X., Zang Z. Intelligent adaptive methods for data preprocessing and multi-indicator fusion early warning of coal-rock dynamic disaster risks in coal mines // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2025. – T. 195. – Art. 106318. – DOI: 10.1016/j.ijrmms.2025.106318.
16. Li S., Yang Y., Wu Z., Xiao R. Interpretable Event-Driven Multisensor Risk-Evolution Analysis for Methane Early Warning // Sensors. – 2026. – T. 26, № 13. – Art. 4126. – DOI: 10.3390/ s26134126.

ARTICLES IN ENGLISH

INFORMATION AND DIGITAL TECHNOLOGIES

COMPUTER SCIENCE, COMPUTING AND CONTROL

Received: 10.11.2026
Accepted: 16.11.2026
Published: 28.11.2026

УДК 519.6+621.386

Statistically weighted total-variation reconstruction for low-dose, sparse-view X-ray tomography: effects of dose, view number and model error

Allamuratova Nilufar Kuat qizi
PhD
Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khwarizmi
Uzbekistan, Tashkent
ORCID: 0009-0008-2999-2134

Статистически взвешенная реконструкция с полной вариацией для низкодозовой рентгеновской томографии с разреженными ракурсами: влияние дозы, числа ракурсов и модельной ошибки

Алламуратова Нилуфар Куат кызы
PhD
Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразми
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Abstract

Low-dose and sparse-view X-ray tomography produces noisy and incomplete data, for which filtered back-projection (FBP) performs poorly. The aim of this work is to separate the contributions of the penalty and of the statistical weights to reconstruction quality, and to test whether these contributions survive model error. We study penalized weighted least-squares (PWLS) reconstruction, with weights derived from the Poisson photon-counting model, combined with a smoothed total-variation (TV) penalty. The method is compared with FBP, a quadratic-penalty

Библиографическое описание: Алламуратова Н.К. кызы Статистически взвешенная реконструкция с полной вариацией для низкодозовой рентгеновской томографии с разреженными ракурсами: влияние дозы, числа ракурсов и модельной ошибки // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23736

For citation: Allamuratova N.K.Q. Statistically weighted total-variation reconstruction for low-dose, // Universum: Technical Sciences : electronic scientific journal. 2026. No. 11(152). Available at: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23736

PWLS and an unweighted least-squares TV variant (LS-TV) on a 64×64 Shepp–Logan phantom with parallel-beam geometry. With 60 views and 10^3–10^5 incident photons per ray, PWLS-TV improved the peak signal-to-noise ratio (PSNR) by 4.9 to 19.2 dB over ramp-filtered FBP. Most of this gain was already obtained with a quadratic penalty (2.5–14.0 dB). Replacing it with TV added 2.4–5.2 dB, and the statistical weights added 0.25–0.91 dB, a difference that is significant in paired comparisons over six noise realizations. The advantage over FBP persisted for 15–120 views at 10^4 photons (9.4–13.9 dB). When the data were generated on a 128×128 grid and reconstructed on a 64×64 grid, the 8.5 % model error exceeded the measurement noise. All methods then reached 20.6–21.7 dB against a common reference image, the PSNR ranking changed, and only the structural similarity index still favoured PWLS-TV over FBP. Regularization parameters were tuned against the ground truth on one noise realization. The work is a controlled numerical study of one two-dimensional phantom and not clinical evidence.

Аннотация

Низкодозовая и разреженно-проекционная рентгеновская томография даёт зашумлённые и неполные данные, для которых классическая фильтрованная обратная проекция (ФОП) работает плохо. Цель работы — выделить вклад штрафа и статистических весов в качество реконструкции и проверить, сохраняется ли этот вклад при модельной ошибке. В работе исследуется реконструкция методом взвешенных наименьших квадратов с штрафом (PWLS), веса которого выводятся из пуассоновской модели счёта фотонов, в сочетании со сглаженным штрафом полной вариации (TV). Метод сравнивается с ФОП, PWLS с квадратичным штрафом и невзвешенным LS-TV на фантоме Шеппа–Логана размером 64×64 при параллельной геометрии. При 60 ракурсах и 10^3–10^5 фотонах на луч PWLS-TV повышал пиковое отношение сигнал/шум (PSNR) относительно ФОП с рамп-фильтром на 4,9–19,2 дБ. Большая часть этого выигрыша достигалась уже квадратичным штрафом (2,5–14,0 дБ); замена его на TV добавляла 2,4–5,2 дБ, статистические веса — 0,25–0,91 дБ, что при парных сравнениях по шести реализациям шума значимо. Преимущество над ФОП сохранялось при 15–120 ракурсах и 10^4 фотонах (9,4–13,9 дБ). Когда данные генерировались на сетке 128×128, а реконструкция велась на сетке 64×64, модельная ошибка (8,5 %) превышала шум, все методы давали 20,6–21,7 дБ относительно общего эталона, ранжирование по PSNR нарушалось, и только индекс структурного сходства по-прежнему выше у PWLS-TV. Параметры регуляризации подбирались по эталонному изображению на одной реализации шума. Работа представляет собой контролируемое численное исследование одного двумерного фантома и не является клиническим доказательством.

Keywords: X-ray tomography, low-dose CT, sparse-view reconstruction, Poisson noise, penalized weighted least squares, total variation, inverse crime.

Ключевые слова: рентгеновская томография, низкодозовая КТ, реконструкция по разреженным ракурсам, пуассоновский шум, взвешенные наименьшие квадраты с штрафом, полная вариация, inverse crime.

Funding: The study received no external funding.

Финансирование: исследование выполнено без внешнего финансирования.

Conflict of interest: The author declares no conflict of interest.
Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Acknowledgements: A language model (Claude, Anthropic) was used to assist with language editing of the manuscript. The author checked all technical statements, numerical results and references and takes full responsibility for the content.
Благодарности: при подготовке текста для языковой редактуры использовалась языковая модель искусственного интеллекта (Claude, Anthropic). Все технические положения, численные результаты и список литературы проверены автором, который несёт полную ответственность за содержание статьи.

1. Introduction

X-ray computed tomography (CT) is widely used in medical diagnostics and in industrial inspection [1, 2]. Its mathematical basis is the inversion of the Radon transform [3]. Radiation exposure is a practical concern [4], and a scan that uses fewer photons per ray or fewer projection views is attractive for that reason and because it shortens acquisition. Both measures reduce dose or scan time, but they produce data that are noisy and sparsely sampled, so the reconstruction problem becomes ill-posed.

Filtered back-projection (FBP) [5] remains the reconstruction method of most commercial scanners, mainly because it is fast and its behaviour is well understood [6]. FBP does not use the statistics of the measurements. The ramp filter amplifies high-frequency noise, and a small number of views produces streak artefacts. Statistical iterative reconstruction starts from the Poisson likelihood of the photon counts [7]. A second-order expansion of this likelihood yields a penalized weighted least-squares (PWLS) problem in which each ray receives a weight reflecting its estimated information content [8, 9]. The approach has been extended to polyenergetic spectra [10] and has been implemented in clinical systems [11]. The physical modelling and the signal statistics are reviewed in [12, 13].

A second line of work relies on sparsity. Total variation (TV) regularization [14] and compressed-sensing theory [15, 16] motivated TV-based CT reconstruction from few views [17]. Comparisons between TV-based and statistical reconstruction have been reported [18], and efficient first-order solvers are available [19]. Learned reconstruction has become an active research direction [20], and comparisons of statistical iterative and learned reconstruction in low-dose CT have been reported recently [21]. Adaptive TV variants for sparse-view CT have also been proposed recently [22]. Learned and adaptive TV methods lie outside the scope of the present comparison, although the latter is close to it and is discussed in Section 6.

In practice, two questions are often mixed together. The first is how much of an improvement comes from the edge-preserving penalty and how much from the statistical weights. The second is whether either effect survives when the forward model used for reconstruction differs from the one that generated the data. The second issue is known as the “inverse crime” [23, 24]: when synthetic data are produced with the same discretization that is later inverted, iterative methods look better than they would on real measurements. Robustness of learned reconstruction to such model errors is an active topic [25].

The aim of this paper is to separate the contributions of the edge-preserving penalty and of the statistical weights to the quality of PWLS reconstruction in low-dose, sparse-view CT, and to test whether these contributions survive model error. To this end, we report a controlled numerical study with the following contributions. (i) We give a compact derivation of the weighted data term and a reproducible reconstruction protocol with a single iteration cap for tuning and evaluation (Section 3, Algorithm 1). (ii) We compare FBP, PWLS with a quadratic penalty, unweighted LS-TV and PWLS-TV over five dose levels and four view numbers, and we test the differences between methods with paired statistics (Section 5). (iii) We add a discretization-mismatch experiment with a common reference image. In it, the PSNR ranking found in (ii) disappears once the model error exceeds the noise level. The practical message is that the advantage of a reconstruction method measured on inverse-crime data may be much larger than its advantage under realistic model error, and the two should be reported separately. The study is limited to a single two-dimensional phantom, as discussed in Section 6.

2. Measurement model

Let $x \in \mathbb{R}^n$ be the vector of attenuation coefficients of an $N \times N$ image, with $n = N^2$. Let $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$ be the system matrix, whose entry a_{ij} is the intersection length of ray i with pixel j. For a monochromatic source with I_0 incident photons per ray, the detected counts follow the Beer–Lambert law with Poisson noise:

$$y_i \sim Poisson\left(I_0 e^{-[Ax]_i}\right), i = 1, \dots, m. \tag{1}$$

The line integrals are estimated by the logarithmic transform $l_i = -ln\,(y_i/I_0)$. By the delta method, the variance of l_i is approximately $1/\mathbb{E}[y_i]$, which we estimate by $1/y_i$ [13]:

$$l_i = -ln\frac{y_i}{I_0}, Var\,(l_i) \approx \frac{1}{y_i}. \tag{2}$$

Rays through dense material therefore carry less information, and the variance depends on the unknown image itself. Zero counts make the logarithm undefined; in that case we replace y_i by 0.5. The exact negative log-likelihood of (1), up to a constant, is

$$L(x) = \sum_{i=1}^{m} \left[d_i(x) - y_i \ln d_i(x)\right], d_i(x) = I_0 e^{-[Ax]_i}. \tag{3}$$

Its derivative with respect to $z_i = [Ax]_i$ vanishes at $z_i = l_i$, where the second derivative equals y_i. A second-order Taylor expansion therefore replaces (3) by $1/2 \sum_i y_i (z_i - l_i)^2$ up to a constant [8, 9]. This gives the PWLS objective

$$\Phi(x) = \frac{1}{2}(Ax - l)^T W (Ax - l) + \mu R(x), \tag{4}$$

where $W = diag\,(w_1, \dots, w_m)$ with $w_i = y_i/I_0$, R is a regularizer, and $\mu > 0$ controls the balance between data fidelity and regularity. Dividing the weights by I_0 is equivalent to rescaling μ: if the unnormalized weights y_i are used, the corresponding penalty weight is $\mu_u = I_0 \mu$. We keep the

normalized convention $w_i = y_i/I_0$ throughout, so the reported values of μ are defined relative to it (Section 4.3). The quadratic data term is itself an approximation. It is inaccurate for very small counts, where the Poisson distribution is far from Gaussian.

3. Regularization and algorithm

3.1. Penalties

Let D_h and D_v denote forward differences in the horizontal and vertical directions, with zero differences at the image border. The quadratic (Tikhonov-type) penalty is

$$R_{quad}(x) = \frac{1}{2} \sum_{p,q} \left[(D_h x)_{pq}^2 + (D_v x)_{pq}^2 \right], \tag{5}$$

and the smoothed isotropic total-variation penalty [14] is

$$R_{TV,\varepsilon}(x) = \sum_{p,q} \sqrt{(D_h x)_{pq}^2 + (D_v x)_{pq}^2 + \varepsilon^2}, \tag{6}$$

where $\varepsilon > 0$ makes $R_{TV,\varepsilon}$ differentiable at zero gradient. We use $\varepsilon = 0.01 \max(x_{true}) \approx 1.8 \times 10^{-3}$ in all experiments. The quadratic penalty is smooth and easy to optimize, but it penalizes large jumps strongly. TV penalizes them only linearly, which preserves edges in piecewise-constant images but can produce staircasing in smooth regions.

3.2. Optimization

The estimator is the constrained minimizer

$$x_{rec} = arg\,min_{x \geq 0} \Phi(x). \tag{7}$$

The non-negativity constraint reflects the physics of attenuation. Because the weights are non-negative, Φ is convex for both penalties, so any local minimizer is global. We use the limited-memory quasi-Newton method L-BFGS-B [26–28], which requires only the gradient

$$\nabla \Phi(x) = A^T W(Ax - l) + \mu \nabla R(x), \tag{8}$$

with, for the TV penalty,

$$\nabla R_{TV,\varepsilon}(x) = D_h^T \left(\frac{D_h x}{\varphi} \right) + D_v^T \left(\frac{D_v x}{\varphi} \right), \tag{9}$$

where the divisions are elementwise. Algorithm 1 summarizes the procedure. The iteration cap $T = 100$ (200 function evaluations) is the same for tuning and for evaluation, and every method starts from a Hann-filtered FBP image. The cap therefore acts as part of the estimator. For one configuration (PWLS-TV, $I_0 = 10^4$, 60 views, one noise realization) the PSNR was identical at $T = 100$ and $T = 300$ (37.57 dB), which indicates that the solver stopped within the cap for that case. This single-realization value differs from the six-realization mean in Table 1 (37.47 dB). We did not check other configurations in this way.

Algorithm 1. PWLS-TV reconstruction from Poisson counts.

Input: counts y, blank-scan intensity I_0, system matrix A, parameters μ, ε, iteration cap T.

1. Compute $l = -ln(\max(y, 0.5)/I_0)$ and $w = max(y, 0.5)/I_0$; set $W = diag(w)$.

2. Warm start: $x^0 = max(FBP_{Hann}(l), 0)$.

1. Define Φ by (4)–(6) and $\nabla\Phi$ by (8)–(9).

2. Run L-BFGS-B to minimize $\Phi(x)$ subject to $x \geq 0$, starting from x^0, for at most $T = 100$ iterations (200 function evaluations). Each iteration requires one product with A, one with A^T and one evaluation of ∇R.

3. Return x_{rec}.

Variants: LS-TV uses $W = mean(w)\, I$ (no per-ray weights); PWLS-Quad replaces $R_{TV,\varepsilon}$ by R_{quad} from (5).

3.3. Filtered back-projection baseline

FBP [6] reconstructs the image as

$$x(u, v) = \int_0^{\pi} (l(\cdot, \theta) * h)(u\cos\theta + v\sin\theta)\, d\theta, \tag{10}$$

where h is the filter kernel: either the ramp (Ram–Lak) filter or the ramp multiplied by a Hann window. Negative values are clipped to zero. In our experiments FBP has no tunable parameter, and it uses neither A nor the statistics of the counts. We implemented FBP with the inverse Radon routine of scikit-image [29]; its absolute PSNR is specific to this implementation.

4. Experimental setup

4.1. Phantom, geometry and data

The test object is the Shepp–Logan phantom [30]. It was resampled to 128×128 and then block-averaged to 64×64, which gives the reference image used in all experiments. The image was scaled so that the maximum line integral over 60 views equals 3, which gives a maximum transmission of $e^{-3} \approx 0.05$; the resulting maximum pixel value is $x_{\max} \approx 0.184$. Projections are parallel-beam with 64 detector bins over $[0^\circ, 180^\circ)$. The matrix A (up to 7680×4096) was built with the Radon transform of scikit-image [29]. Subsets of 15, 30, 60 and 120 equispaced views of a 120-view grid were used. Counts were drawn from (1) for $I_0 \in \{10^5, 3\times10^4, 10^4, 3\times10^3, 10^3\}$. The relative norm of the noise in the log-data, $\|l - Ax_{true}\| / \|Ax_{true}\|$, was 0.45, 0.81, 1.41, 2.58 and 4.50 % for these doses (60 views, mean of 20 draws). Figure 1 shows the phantom and an example of the data.

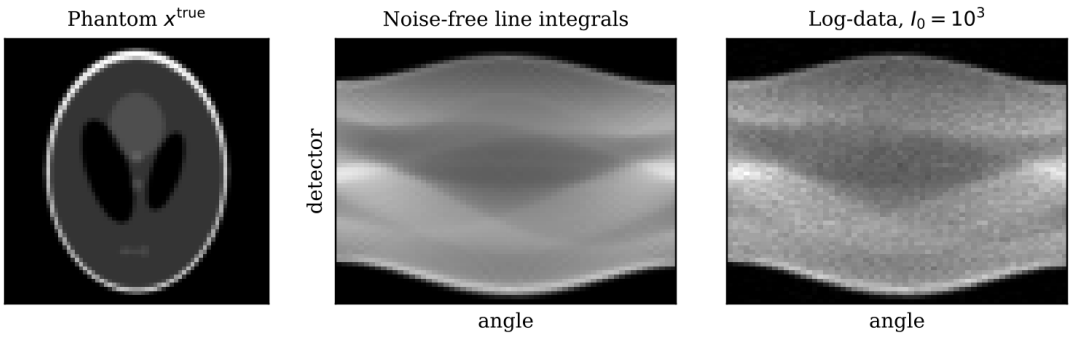


Figure 1. Phantom (left), noise-free line integrals (middle; 60 views) and log-transformed Poisson data at $I_0 = 10^3$ (right; one realization)

4.2. Compared methods and metrics

Five reconstructions are compared: FBP with the ramp filter; FBP with the Hann filter; PWLS-Quad (weights w, penalty (5)); LS-TV (constant weights equal to $mean(w)$, penalty (6)); and PWLS-TV (weights w, penalty (6)). Image quality is measured against the reference image by the peak signal-to-noise ratio and by the structural similarity index [31]:

$$PSNR = 10\log_{10}\left(\frac{x_{\max}^2}{MSE}\right), MSE = \frac{\|x_{rec} - x_{true}\|^2}{n}, \quad (11)$$

where n is the number of pixels and $x_{\max} = max\,(x_{true})$. SSIM uses the library defaults (7×7 window) and the same data range. Absolute PSNR values depend on this convention and on the phantom, so only differences between methods should be interpreted. Differences between methods were tested with paired t-tests over the six noise realizations; each realization uses the same noise for all methods.

4.3. Parameter selection and replication

For each dose (or view number) and method, μ was selected by a coarse logarithmic grid search over eight values in $\left[10^{-6}, 10^{-0.5}\right]$, followed by a refinement with two values at factors $10^{\pm 0.35}$ around the best grid point. The search used one noise realization, and the selected value maximizes the PSNR against the reference image. This is oracle tuning. It favours the iterative methods, because FBP has no tuned parameter, and it is not available in practice; data-driven rules are discussed in [32]. The selected μ was then fixed, and each method was evaluated on six independent noise realizations. The calibration and evaluation draws use different seeds. Both use the same iteration cap $T = 100$. All code uses NumPy [33] and SciPy [34].

Because $w_i = y_i / I_0$, the reported μ equals μ_u / I_0, where μ_u is the penalty weight of the unnormalized Poisson objective. The dose trend of μ therefore reflects both the change in regularization strength and this normalization.

4.4. Model-mismatch experiment

To test the inverse crime, a second experiment generated the line integrals from a 128×128 version of the phantom, rebinned them to 64 detector bins by averaging adjacent bins, and reconstructed them on the 64×64 grid with the same matrix A. The reference image is the same 64×64 image as in Section 4.1, so the two experiments differ only in the forward model used to

generate the data. The relative mismatch $\| Ax_{true} - p \| / \| p \|$ between the model prediction and the mismatched data p is 8.5 %, which exceeds the relative noise at every dose in Section 4.1 (0.45–4.50 %). The comparison used $I_0 \in \{10^5, 10^4, 10^3\}$, 60 views and the same tuning protocol. The mismatch represents discretization (partial-volume) error only. Beam hardening, scatter and detector blur are not modelled.

5. Results

5.1. Effect of dose

Figure 2 shows reconstructions from one noise realization, and Table 1 and Figure 3 give statistics over six realizations. PWLS-TV has the highest mean PSNR at every dose, from 45.41 dB at $I_0 = 10^5$ to 29.97 dB at $I_0 = 10^3$. Its advantage over ramp-filtered FBP shrinks as the dose decreases: 19.2, 15.4, 11.4, 7.8 and 4.9 dB from the highest to the lowest dose. PWLS-Quad alone is already 14.0, 11.0, 7.9, 4.7 and 2.5 dB above ramp-FBP. Ramp-FBP changes only slightly over the dose range (26.24 to 25.11 dB), so its error is dominated by factors other than noise, such as angular undersampling and ringing at edges. FBP with the Hann filter stays near 21.6 dB at every dose and is limited by blurring. It has a lower PSNR than ramp-FBP, but a higher SSIM at $I_0 = 10^3$ (0.782 against 0.741).

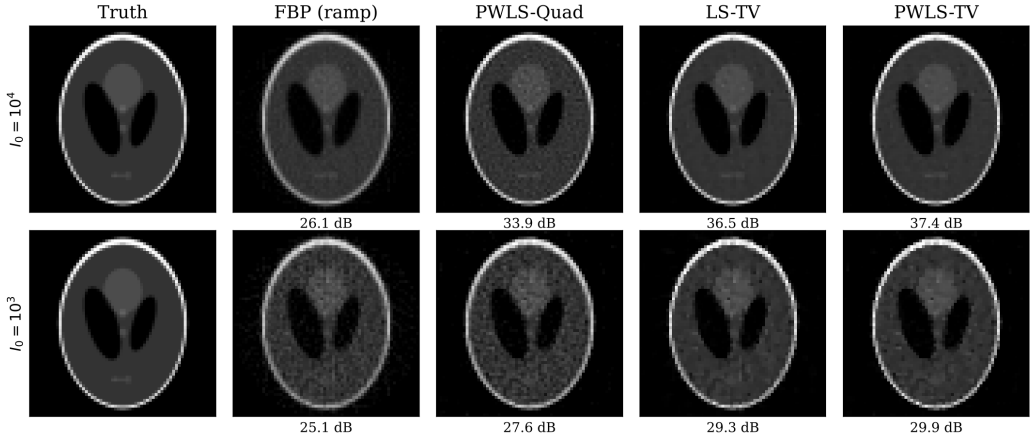


Figure 2. Reconstructions from one noise realization at $I_0 = 10^4$ ***(top) and*** 10^3 ***(bottom), 60 views. The PSNR of each reconstruction is given below its panel; the display window is*** $[0, \max(x_{true})]$

Visually (Figure 2), PWLS-Quad retains fine-grained noise, whereas the TV reconstructions show larger blotchy residuals but sharper edges. Replacing the quadratic penalty with TV improves PSNR by 5.2, 4.3, 3.4, 3.1 and 2.4 dB from the highest to the lowest dose. SSIM rises from 0.977 to 0.995 at $I_0 = 10^5$. The gain from TV is therefore largest at the highest dose and falls as the data become noise-dominated.

Table 1. PSNR (dB) / SSIM versus dose, 60 views, mean of six realizations. Bold marks the best PSNR in each row

I_0	FBP (ramp)	FBP (Hann)	PWLS-Quad	LS-TV	PWLS-TV
10^5	26.24 / 0.896	21.66 / 0.821	40.24 / 0.977	45.16 / 0.995	**45.41 / 0.995**
3×10^4	26.21 / 0.890	21.66 / 0.820	37.23 / 0.961	41.01 / 0.991	**41.57 / 0.991**
10^4	26.11 / 0.874	21.65 / 0.817	34.05 / 0.936	36.76 / 0.981	**37.47 / 0.983**

I_0	FBP (ramp)	FBP (Hann)	PWLS-Quad	LS-TV	PWLS-TV
3×10^3	25.82 / 0.824	21.64 / 0.807	30.54 / 0.897	32.70 / 0.939	**33.61 / 0.966**
10^3	25.11 / 0.741	21.62 / 0.782	27.62 / 0.848	29.29 / 0.896	**29.97 / 0.905**

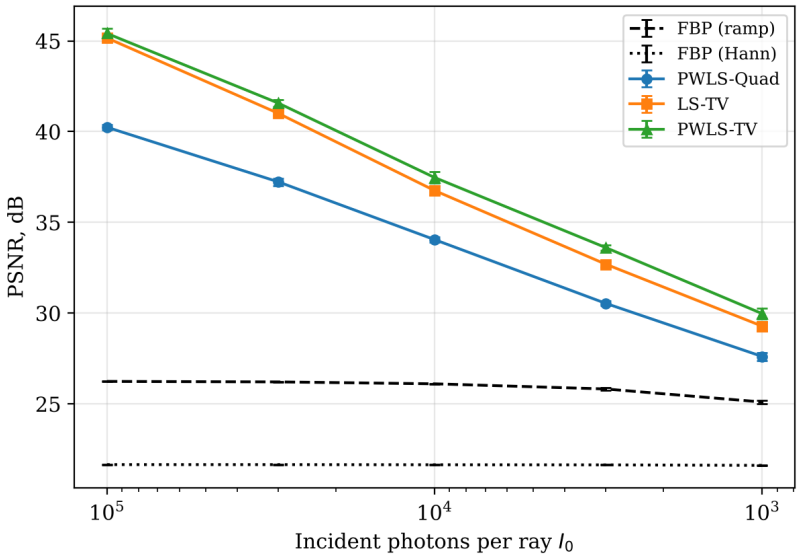


Figure 3. PSNR versus incident photons per ray (60 views); mean ± SD over six realizations

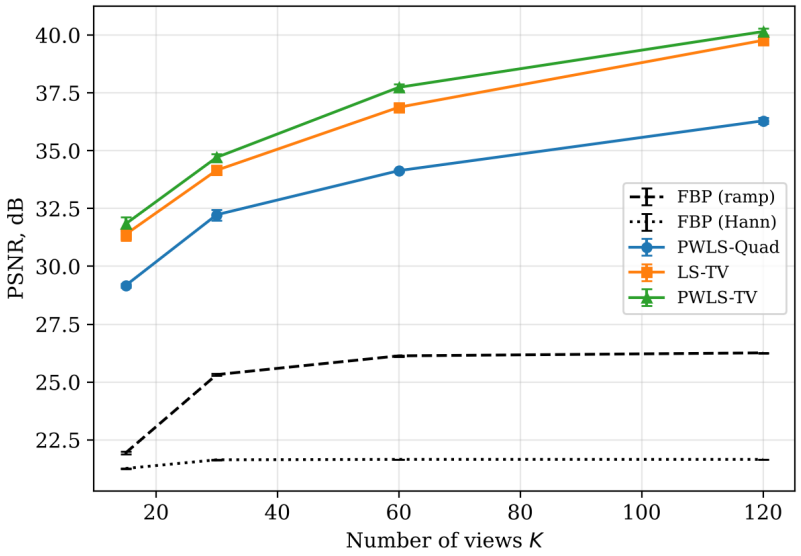


Figure 4. PSNR versus number of views ($I_0 = 10^4$); mean ± SD over six realizations

5.2. Effect of the number of views

At $I_0 = 10^4$ (Table 2, Figure 4), PWLS-TV leads ramp-FBP by 9.9, 9.4, 11.6 and 13.9 dB for 15, 30, 60 and 120 views. FBP improves from 21.9 to 25.3 dB when the number of views doubles from 15 to 30, and saturates beyond 60 views (26.1 to 26.3 dB). The iterative methods keep improving up to 120 views. With 15 views the three iterative methods span 29.2 to 31.8 dB, a spread of 2.7 dB, with PWLS-Quad lowest. The paired weight effect (PWLS-TV minus LS-TV) is positive at every view number (0.38–0.86 dB); we did not run separate significance tests for this experiment. The PWLS-TV value at 60 views in Table 2 (37.74 dB) differs from Table 1 (37.47 dB)

by 0.27 dB because Table 2 uses an independent set of six noise realizations. This difference is of the order of the realization-to-realization spread and should be kept in mind when comparing the two tables.

$$KI_0 = 10^4$$

Table 2. PSNR (dB) ± SD versus number of views at, six realizations. Bold marks the best mean

K	FBP (ramp)	FBP (Hann)	PWLS-Quad	LS-TV	PWLS-TV
15	21.94 ± 0.05	21.26 ± 0.01	29.17 ± 0.09	31.38 ± 0.26	**31.83 ± 0.29**
30	25.32 ± 0.05	21.64 ± 0.01	32.23 ± 0.23	34.16 ± 0.18	**34.71 ± 0.16**
60	26.13 ± 0.03	21.66 ± 0.01	34.14 ± 0.06	36.88 ± 0.15	**37.74 ± 0.14**
120	26.26 ± 0.02	21.66 ± 0.01	36.29 ± 0.13	39.77 ± 0.16	**40.15 ± 0.15**

5.3. Role of the statistical weights and of μ

PWLS-TV exceeds unweighted LS-TV by 0.25, 0.56, 0.71, 0.91 and 0.68 dB from $I_0 = 10^5$ to 10^3. Paired t-tests over the six realizations give $p = 0.022$ at 10^5 and $p < 0.001$ at all other doses. The weight effect is therefore small compared with the TV effect (2.4–5.2 dB), but it is systematic. Unlike the TV effect, it does not decline monotonically: it grows as the dose falls to 3×10^3 and then decreases slightly at 10^3. The effect is limited to six realizations and one phantom, so the magnitude should be checked with more realizations and more images.

The selected regularization strength follows the noise (Figure 5). For PWLS-TV, μ rises from 1.4×10^{-3} at $I_0 = 10^5$ to 2.3×10^{-2} at $I_0 = 10^3$, a factor of about 16. For LS-TV it rises from 3.1×10^{-3} to 5.2×10^{-2}. For PWLS-Quad it rises from 0.023 to 0.71. The last value is the upper end of the refinement range, so the optimum may be larger and the PWLS-Quad PSNR at 10^3 may be slightly underestimated. The refinement step is a factor of about 2.2 in μ, so the selected values are indicative only.

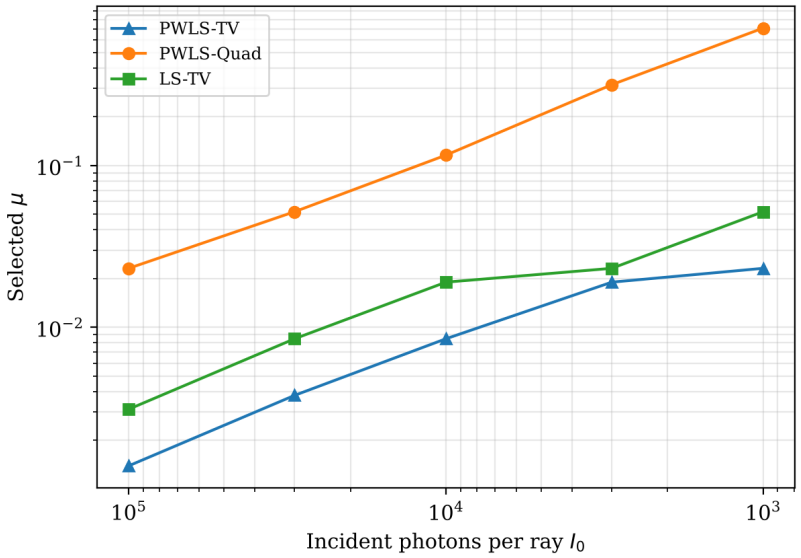


Figure 5. Selected μ versus dose for PWLS-TV, PWLS-Quad and LS-TV (log scale). The values depend on the normalization of Section 4.3

5.4. Effect of model mismatch

Table 3 and Figure 6 show the results of the mismatch experiment. All methods fall between 20.60 and 21.71 dB regardless of dose, compared with up to 45.41 dB in the consistent experiment. Ramp-FBP has the highest PSNR at $I_0 = 10^5$ and 10^4 (21.71 and 21.67 dB, against 21.01 dB for PWLS-TV at both doses). At $I_0 = 10^3$ LS-TV is best, but only 0.02 dB above ramp-FBP, which is negligible. SSIM, however, still favours PWLS-TV over FBP at every dose. At $I_0 = 10^3$ it reaches 0.846 against 0.677 for ramp-FBP, and at 10^5 it is 0.862 against 0.815 (PWLS-Quad is close behind at 10^5, with 0.860). Because the reference image is now the same in both experiments, this reversal can be attributed to the model error and not to a change of reference. A plausible explanation is that once the model error exceeds the noise, PSNR is dominated by an error that no penalty can remove, while structural quality can still be improved by regularization. We did not test this explanation directly, for example by varying the mismatch level. The selected μ for PWLS-Quad (0.71 at all three doses) and for LS-TV (0.32 at all three doses) lies at the upper end of the search range, so these two methods may be under-regularized in Table 3.

Table 3. Mismatch experiment (data from 128×128, reconstruction on 64×64, common reference image): PSNR (dB) / SSIM, 60 views, mean of six realizations. Bold marks the best PSNR in each row

I_0	FBP (ramp)	FBP (Hann)	PWLS-Quad	LS-TV	PWLS-TV
10^5	**21.71 / 0.815**	20.66 / 0.787	21.03 / 0.860	21.35 / 0.844	21.01 / 0.862
10^4	**21.67 / 0.795**	20.65 / 0.783	20.99 / 0.842	21.34 / 0.843	21.01 / 0.861
10^3	21.22 / 0.677	20.60 / 0.754	20.61 / 0.751	**21.24 / 0.832**	20.93 / 0.846

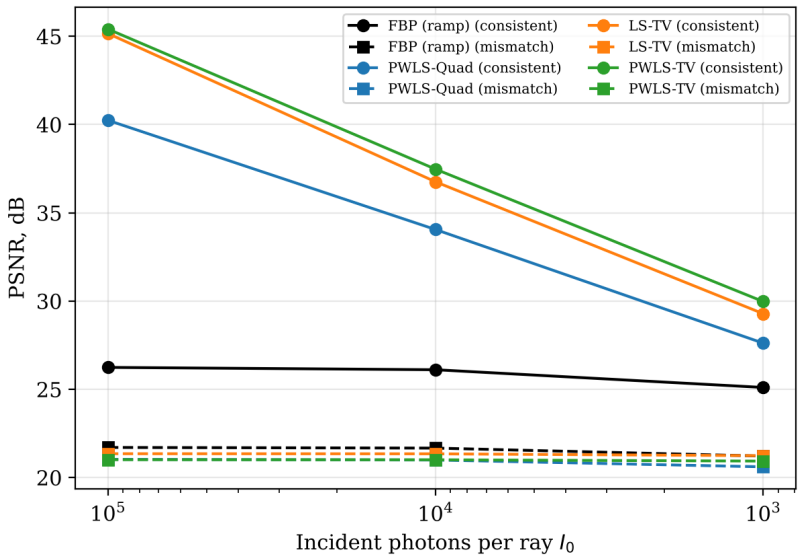


Figure 6. PSNR versus dose for consistent data (solid) and mismatched data (dashed), common reference image

6. Discussion and limitations

Three observations follow from the experiments. First, in the consistent experiment the choice of penalty mattered more than the statistical weighting. The TV penalty added 2.4–5.2 dB, and the weights 0.25–0.91 dB. The benefit of TV was largest at the highest dose. Second, the weights add

negligible computational cost, because they are computed directly from the counts, and their benefit had the same sign at every dose (paired tests) and at every view number (Section 5.2). Third, results obtained when the synthetic data share the forward model with the reconstruction should not be taken at face value [23, 24]. For PWLS-TV at $I_0 = 10^5$ the PSNR falls by 24.4 dB between Tables 1 and 3. With the reference image held fixed, this drop is caused by the model error, and the ranking of methods changes with it.

The study has clear limitations. It uses one phantom, which is piecewise constant and therefore the ideal case for TV. Anatomical images contain texture and gradual transitions, where TV can give a cartoon-like appearance. Penalized estimators also have non-uniform resolution and noise [35], which PSNR and SSIM do not capture. The geometry is two-dimensional and parallel-beam, and the noise model is Poisson only. Electronic noise [36], scatter and beam hardening [10] are not modelled. The parameters μ were tuned with the reference image, which is optimistic for all iterative methods; data-driven selection rules would be expected to give lower PSNR [32]. The statistical tests use six noise realizations of one phantom, so they quantify noise variability but not image-to-image variability. The iteration cap $T = 100$ was fixed for all methods, and the convergence check covers one configuration only. Other solvers [19], priors, learned reconstruction [20] and adaptive TV variants [22] were not compared. The model-error level was fixed at one value (8.5 %), so the mismatch conclusion should be checked over a range of levels. The PWLS-Quad and LS-TV values in Table 3 are at the edge of the search grid. Finally, the PSNR values depend on our normalization and should not be compared directly with other studies.

7. Conclusion

Within the limits described above, PWLS-TV gave the highest PSNR among the compared methods when the data were generated with the reconstruction model. Its gains over ramp-filtered FBP were 4.9–19.2 dB across 10^3–10^5 photons per ray and 9.4–13.9 dB across 15–120 views. Most of this gain was already obtained with a quadratic penalty. TV added 2.4–5.2 dB, and the statistical weights added 0.25–0.91 dB, a difference that was significant in paired tests. When the data came from a finer grid than the reconstruction, the PSNR advantage disappeared, while SSIM still favoured PWLS-TV over FBP. For practical use, we recommend that reconstruction methods be checked on data with physically motivated model error before their advantage is reported. Future work should include textured and anatomical phantoms, several model-error levels, data-driven parameter selection, and more realizations.

References

1. Hsieh J. Computed Tomography: Principles, Design, Artifacts, and Recent Advances. 2nd ed. – Bellingham: SPIE Press, 2009. – 556 P.
2. Wang G., Yu H., De Man B. An outlook on x-ray CT research and development. Medical Physics, 2008, vol. 35, no. 3, P. 1051–1064.
3. Natterer F. The Mathematics of Computerized Tomography. – Philadelphia: SIAM, 2001. – 222 P.
4. Brenner D.J., Hall E.J. Computed tomography: an increasing source of radiation exposure. New England Journal of Medicine, 2007, vol. 357, no. 22, P. 2277–2284.

5. Kak A.C., Slaney M. Principles of Computerized Tomographic Imaging. – Philadelphia: SIAM, 2001. – 327 P.
6. Pan X., Sidky E.Y., Vannier M. Why do commercial CT scanners still employ traditional, filtered back-projection for image reconstruction? Inverse Problems, 2009, vol. 25, no. 12, art. 123009.
7. Lange K., Carson R. EM reconstruction algorithms for emission and transmission tomography // Journal of Computer Assisted Tomography. – 1984. – No. 2. – P. 306–316.
8. Sauer K., Bouman C. A local update strategy for iterative reconstruction from projections. IEEE Transactions on Signal Processing, 1993, vol. 41, no. 2, P. 534–548.
9. Fessler J.A. Penalized weighted least-squares image reconstruction for positron emission tomography. IEEE Transactions on Medical Imaging, 1994, vol. 13, no. 2, P. 290–300.
10. Elbakri I.A., Fessler J.A. Statistical image reconstruction for polyenergetic X-ray computed tomography. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2002, vol. 21, no. 2, P. 89–99.
11. Thibault J.-B., Sauer K.D., Bouman C.A., Hsieh J. A three-dimensional statistical approach to improved image quality for multislice helical CT. Medical Physics, 2007, vol. 34, no. 11, P. 4526–4544.
12. Nuyts J., De Man B., Fessler J.A., Zbijewski W., Beekman F.J. Modelling the physics in the iterative reconstruction for transmission computed tomography. Physics in Medicine and Biology, 2013, vol. 58, no. 12, P. R63–R96.
13. Whiting B.R. Signal statistics in X-ray computed tomography // Proceedings of SPIE. – 2002. – P. 53–60.
14. Rudin L.I., Osher S., Fatemi E. Nonlinear total variation based noise removal algorithms. Physica D, 1992, vol. 60, no. 1–4, P. 259–268. DOI: 10.1016/0167–2789(92)90242-F.
15. Candès E.J., Romberg J., Tao T. Robust uncertainty principles: exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, vol. 52, no. 2, P. 489–509.
16. Donoho D.L. Compressed sensing. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, vol. 52, no. 4, P. 1289–1306. DOI: 10.1109/TIT.2006.871582.
17. Sidky E.Y., Pan X. Image reconstruction in circular cone-beam computed tomography by constrained, total-variation minimization. Physics in Medicine and Biology, 2008, vol. 53, no. 17, P. 4777–4807.
18. Tang J., Nett B.E., Chen G.-H. Performance comparison between total variation (TV)-based compressed sensing and statistical iterative reconstruction algorithms. Physics in Medicine and Biology, 2009, vol. 54, no. 19, P. 5781–5804.
19. Chambolle A., Pock T. A first-order primal-dual algorithm for convex problems with applications to imaging // Journal of Mathematical Imaging and Vision. – 2011. – No. 1. – P. 120–145.
20. Zhang M., Gu S., Shi Y. The use of deep learning methods in low-dose computed tomography image reconstruction: a systematic review. Complex & Intelligent Systems, 2022, vol. 8, no. 6, P. 5545–5561. DOI: 10.1007/s40747-022-00724-7.

21. Tian Q., Li X., Li J., Cheng Y., Niu X., Zhu S., Xu W., Guo J. Image quality improvement in low-dose chest CT with deep learning image reconstruction // Journal of Applied Clinical Medical Physics. – 2022. – No. 12. – DOI: 10.1002/acm2.13796.
22. Yu Z., Wen X., Yang Y. Reconstruction of Sparse-View X-ray Computed Tomography Based on Adaptive Total Variation Minimization. Micromachines, 2023, vol. 14, no. 12, art. 2245. DOI: 10.3390/mi14122245.
23. Kaipio J., Somersalo E. Statistical inverse problems: discretization, model reduction and inverse crimes // Journal of Computational and Applied Mathematics. – 2007. – No. 2. – P. 493–504.
24. Wirgin A. The inverse crime. arXiv:math-ph/0401050. – 2004.
25. Genzel M., Macdonald J., März M. Solving inverse problems with deep neural networks: robustness included? IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2022. – DOI: 10.1109/TPAMI.2022.3148324.
26. Byrd R.H., Lu P., Nocedal J., Zhu C. A limited memory algorithm for bound constrained optimization. SIAM Journal on Scientific Computing, 1995, vol. 16, no. 5, P. 1190–1208.
27. Zhu C., Byrd R.H., Lu P., Nocedal J. Algorithm 778: L-BFGS-B: Fortran subroutines for large-scale bound-constrained optimization. ACM Transactions on Mathematical Software, 1997, vol. 23, no. 4, P. 550–560.
28. Liu D.C., Nocedal J. On the limited memory BFGS method for large scale optimization. Mathematical Programming, 1989, vol. 45, P. 503–528. [29] van der Walt S., Schönberger J.L., Nunez-Iglesias J., et al. scikit-image: image processing in Python. PeerJ, 2014, vol. 2, art. e453.
29. Shepp L.A., Logan B.F. The Fourier reconstruction of a head section. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1974, vol. 21, no. 3, P. 21–43.
30. Wang Z., Bovik A.C., Sheikh H.R., Simoncelli E.P. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, vol. 13, no. 4, P. 600–612.
31. Hansen P.C. Discrete Inverse Problems: Insight and Algorithms. – Philadelphia: SIAM, 2010. – 213 P.
32. Harris C.R., Millman K.J., van der Walt S.J., et al. Array programming with NumPy. Nature, 2020, vol. 585, P. 357–362.
33. Virtanen P., Gommers R., Oliphant T.E., et al. SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. Nature Methods, 2020, vol. 17, P. 261–272.
34. Fessler J.A., Rogers W.L. Spatial resolution properties of penalized-likelihood image reconstruction: space-invariant tomographs. IEEE Transactions on Image Processing, 1996, vol. 5, no. 9, P. 1346–1358.
35. Xu J., Tsui B.M.W. Electronic noise modeling in statistical iterative reconstruction. IEEE Transactions on Image Processing, 2009, vol. 18, no. 6, P. 1228–1238.

Received: 10.10.2026
Accepted: 22.10.2026
Published: 28.11.2026

УДК 519.816+331.108+004.9

DOI: 10.32743/UniTech.2026.152.11.23612

Regret-aware shortlisting and decision-focused measures for choosing what to verify in candidate selection

Babayev Samir Cahid
PhD student
Azerbaijan State Oil and Industry University
Azerbaijan, Baku
E-mail: samircbabayev@gmail.com

Формирование списка кандидатов с учётом индивидуального сожаления и выбор проверяемых сведений на основе показателей, ориентированных на решение

Бабаев Самир Джахид
аспирант
Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности
Азербайджанская Республика, г. Баку

Abstract

Screening selects k candidates for interviews, a severe weakness in one criterion should not be offset by other scores, and each check of uncertain resume information costs recruiter time. The aim of the study is to show how the interview shortlist depends on the aggregation rule and to identify a measure for choosing what to verify that is tied to the shortlist decision. The measure proposed is the mutual information between a verified score and shortlist membership, estimated in a single pass (MI_1) from the same draws that give SMAA-VIKOR membership probabilities. Unlike SMAA-VIKOR it indicates what to verify, and unlike the value of information it needs no nested simulation. On six illustrative candidates, VIKOR is compared with simple additive weighting (SAW) and TOPSIS. SAW does not separate a candidate who scores 3 out of 10 on information security from two others, while in this example the VIKOR parameter v moves the admission threshold from 5.1 to 2.1. In 500 synthetic instances with k = 5, v = 0.5 and four criteria, the entropy of the queried score found the most valuable query in 1.8 % of instances and the mutual information in 76.8 %. MI_1 was about 200 times faster than nested value-of-information estimation

Библиографическое описание: Бабаев С.Д. Формирование списка кандидатов с учётом индивидуального сожаления и выбор проверяемых сведений на основе показателей, ориентированных на решение // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23612

For citation: Babayev S.C. Regret-aware shortlisting and decision-focused measures for choosing what to verify in candidate selection // Universum: Technical Sciences : electronic scientific journal. 2026. No. 11(152). Available at: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23612

and chose the same top query as nested mutual information in 91.2 % of instances, although its rank correlation with the value of information over all queries was 0.21. The results assume exact answers, independent scores and a single query.

Аннотация

На этапе предварительного отбора решается, какие k кандидатов будут приглашены на собеседование; серьёзный недостаток по одному критерию не должен компенсироваться другими оценками, а каждая проверка неопределённых сведений из резюме требует времени рекрутера. Цель исследования состоит в том, чтобы показать, как состав списка зависит от правила агрегирования, и определить показатель выбора проверки, связанный с решением о составе списка. Предлагаемый показатель представляет собой взаимную информацию между проверяемой оценкой и попаданием кандидатов в список, которая оценивается за один проход (MI_1) по тем же реализациям, что и вероятности попадания в список в методе SMAA-VIKOR. В отличие от SMAA-VIKOR он указывает, какую оценку следует проверить, а в отличие от ценности информации не требует вложенного моделирования. На условном примере из шести кандидатов метод VIKOR сравнивается с методами SAW и TOPSIS. SAW не отличает кандидата с оценкой 3 из 10 по информационной безопасности от двух других кандидатов, а в VIKOR для данного примера параметр v сдвигает порог включения в список от 5,1 до 2,1. В 500 синтетических задачах при k = 5, v = 0,5 и четырёх критериях энтропия проверяемой оценки выбрала наиболее ценную проверку в 1,8 % задач, а взаимная информация с попаданием в список в 76,8 %. Оценка MI_1 оказалась примерно в 200 раз быстрее вложенной оценки ценности информации и в 91,2 % задач выбрала ту же проверку, что и вложенная оценка взаимной информации, однако её ранговая корреляция с ценностью информации по всем проверкам составила лишь 0,21. Результаты получены в предположении точных ответов, независимых оценок и одной проверки.

Keywords: personnel selection, interview shortlist, VIKOR, individual regret, SMAA, value of information, mutual information.

Ключевые слова: отбор персонала, список кандидатов на собеседование, метод VIKOR, индивидуальное сожаление, SMAA, ценность информации, взаимная информация.

1. Introduction

When a vacancy attracts many applicants, only a shortlist of k candidates formed from resumes is interviewed. TOPSIS and its variants appear in half of the personnel-selection studies covered by a recent systematic review [7]. Fuzzy VIKOR has also been applied to candidate ranking [1]. In simple additive weighting (SAW) a low score on one criterion is fully offset by high scores on the others, and TOPSIS has no separate indicator of the weakest criterion [9]. Each check of uncertain candidate information also costs recruiter time. Interview systems based on large language models choose the next question by expected information gain [3]. This measure shows how much a check reduces uncertainty about a score, but not whether the check can change the decision. Decision theory defines the value of information through the expected utility of the best decision [5]. Decision-focused learning likewise evaluates predictions by the decisions they lead to [8]. These approaches leave a gap between them. SMAA-VIKOR gives the probability that each

candidate belongs to the shortlist [2, 10], but does not say which uncertain score should be checked. The value of information answers this question for the decision itself [5], but in a shortlisting problem it requires nested simulation for every possible query. Information-based selection of questions [3] is fast, but it targets uncertainty about the score rather than about the shortlist.

The aim of the paper is to show how the shortlist depends on the aggregation rule and how well different measures choose what to verify. The contribution of the paper is a verification measure tied to the shortlist decision, namely the mutual information between the queried score and shortlist membership, together with its single-pass estimate MI_1, which reuses the draws already made for SMAA-VIKOR membership probabilities. The measure is compared with the value of information as the reference, with the entropy of the queried score and with a simple heuristic.

2. Materials and Methods

2.1. Aggregation rules

Let m candidates be evaluated on n criteria with scores x_{ij} on a scale with worst value f_j^- and ideal value f_j^*, and with weights $w_j > 0$, $\sum_j w_j = 1$. The shortlist L_k contains the k best-ranked candidates. SAW scores a candidate by the weighted sum of normalised scores [6]. For candidate i

$$\mathrm{SAW}_i = \sum_j w_j \frac{x_{ij} - f_j^-}{f_j^* - f_j^-}. \tag{1}$$

TOPSIS describes each candidate by its distance to an ideal profile, made of the best weighted values in the candidate set, and to an anti-ideal profile, made of the worst ones, and prefers the candidate that is close to the first and far from the second. TOPSIS ranks candidates by the closeness coefficient [6, 9]

$$C_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-}, \tag{2}$$

where d_i^+ and d_i^- are the Euclidean distances of the vector-normalised weighted scores to the best and worst values over the candidate set. VIKOR seeks a compromise between two views of a candidate [9]. Group utility S_i is the weighted total shortfall of candidate i from the ideal over all criteria, so it measures overall performance, while individual regret R_i is the largest single weighted shortfall, so it measures the weakest criterion. The index Q_i combines both after normalisation over the candidate set, and the parameter v sets how much weight goes to group utility rather than to individual regret. For shortlisting this matters because a low R_i prevents one critical weakness from being hidden by strong scores elsewhere.

$$S_i = \sum_j w_j \frac{f_j^* - x_{ij}}{f_j^* - f_j^-}, \quad R_i = \max_j w_j \frac{f_j^* - x_{ij}}{f_j^* - f_j^-}, \tag{3}$$

$$Q_i = v\frac{S_i - S^*}{S^- - S^*} + (1 - v)\frac{R_i - R^*}{R^- - R^*}, \tag{4}$$

where S^* and S^- are the smallest and largest S_i, R^* and R^- are defined in the same way, and $v \in [0, 1]$ is the weight of group utility. Candidates are ordered by increasing Q_i. With f_j^* and f_j^- at the scale bounds, S_i and R_i depend only on candidate i. The veto threshold is the lowest score on the weak criterion at which the candidate still enters the shortlist. Because Q_i is normalised by S^*, S^-, R^* and R^- of the candidate set, and TOPSIS distances are also normalised over the candidate set, the position of a candidate and therefore the veto threshold depend on the other candidates. The acceptable-advantage and stability conditions were not applied, because they serve to select a single compromise solution, whereas a shortlist requires the top k by Q. In the example all Q values are distinct, so no tie-breaking was needed; under SAW, A, B and C remain tied at 0.700.

2.2. Membership probability, verification measures and computational design

Each x_{ij} is a triangular fuzzy number (a_{ij}, c_{ij}, b_{ij}). It is replaced by the triangular distribution with the same parameters, which is consistent with the fuzzy number read as a possibility distribution [4]. The three parameters describe what is known about a score. The mode c_{ij} is the most plausible score, while a_{ij} and b_{ij} are the lowest and highest scores that the available information still allows. In practice c_{ij} can be set from the score that the resume claim supports as stated, and the range from how well the claim is documented, so that a claim backed by verifiable evidence receives a narrow range and an unsupported claim a wide one. The parameters can be given by a recruiter on the rating scale or derived from the output of an extraction model. Membership probabilities are obtained in the spirit of stochastic multicriteria acceptability analysis (SMAA). Many joint realisations of the uncertain scores are drawn, the ranking rule is applied to each realisation, and the share of realisations in which a candidate attains a given position is recorded. Here the position of interest is membership of the shortlist, and $1[\cdot]$ below is the indicator function, equal to 1 when the condition in brackets holds and 0 otherwise. The shortlist membership probability is estimated from N draws as

$$P_i \approx \frac{1}{N} \sum_t 1\left[i \in L_k\left(x^{(t)}\right)\right], \tag{5}$$

where $L_k(x^{(t)})$ is the VIKOR shortlist for the t-th draw, as in SMAA-VIKOR [2, 10].

A query is a single check of one score, for example asking a candidate for a certificate or a code sample, after which the score becomes known. A good query is one whose answer can change the shortlist. The value of perfect information expresses this directly, as the expected gain in the quality of the best shortlist after the answer compared with the best shortlist before it. Entropy measures how uncertain a quantity is, and the entropy of a score shows how much a query would tell about that score. Mutual information measures how much knowing one quantity reduces uncertainty about another, so the mutual information between a score and the membership indicators shows how much a query would tell about the shortlist. The entropy and the value of information therefore differ in their object, the score or the decision, and the mutual information shares its object with the value of information while avoiding its optimisation over shortlists.

A query q = (i, j) reveals x_{ij}. Let T(x) be the shortlist that the VIKOR rule would form if the vector x of true scores were known, $Z_l = 1[l \in T(x)]$ and $u(L, x) = |L \cap T(x)|$. Thus u counts the members of a shortlist L that belong to the true shortlist, E denotes expectation over the uncertain scores (with the subscript x_{ij}, over the answer to the query), and H denotes Shannon entropy in bits. The reference measure is the expected value of perfect information [5]

$$\mathrm{VoI}(q) = E_{x_{ij}}\left[\max_L E\left(u|x_{ij}\right)\right] - \max_L E(u). \quad (6)$$

The mutual information in bits also refers to the shortlist:

$$\mathrm{MI}(q) = \sum_l \left[H\left(Z_l\right) - E_{x_{ij}} H\left(Z_l|x_{ij}\right)\right]. \quad (7)$$

The entropy of the queried score in 0.5-point bins is

$$\mathrm{IG}(q) = H\left(x_{ij}\right). \quad (8)$$

A bin of half a point is finer than the integer steps of the ten-point rating scale, so it resolves every difference a rater could report. For a continuous score the discretised entropy is approximately the differential entropy minus $\log_2$ of the bin width, so a change of the bin width shifts the IG of all queries by nearly the same amount and leaves their order largely unchanged as long as the bins are narrow relative to the spread. For the narrowest spreads the discretisation does affect IG, which is a limitation of this measure. A borderline candidate is one whose membership of the shortlist is uncertain. The heuristic takes the candidate whose P_i is closest to 0.5 and queries its criterion with the widest spread $b_{ij} - a_{ij}$.

The randomized study uses 500 instances with m from 20 to 50, n = 4, Dirichlet(4, 4, 4, 4) weights, k = 5 and v = 0.5, score modes equal to a latent quality from U(3, 8) plus $N(0, 1.5^2)$ noise and spreads from U(0.2, 2.5). VoI and MI are estimated by nested Monte Carlo with 64 stratified outer points and 1,000 inner draws. The single-pass estimate MI_1 splits N = 1,000 SMAA draws into eight equiprobable bins of x_{ij}. To keep the term distinct from the individual regret R_i of VIKOR, the quality of a rule is expressed by its value loss, the difference between the largest VoI in the instance and the VoI of the query the rule ranks first; the relative value loss divides it by the largest VoI (491 instances with largest VoI above 0.01). Spearman ρ with VoI is computed over all queries and over borderline candidates, taken as those with $0.1 < P_i < 0.9$. All computations use fixed random seeds. The generator, its parameters and the estimation settings given above are sufficient to reproduce the synthetic experiment. Code and data are available from the author on reasonable request.

3. Results and Discussion

3.1. Critical weakness and the veto threshold

Table 1 lists the aggregated values computed by Eqs. (1)–(4): SAW by Eq. (1), C by Eq. (2), S and R by Eq. (3) and Q by Eq. (4). SAW assigns 0.700 to A, B and C, and only R separates them (Table 1). The tie does not affect the SAW shortlist for k = 3, because A, B and C all precede E (0.667). TOPSIS, which normalises over the candidate set, ranks A fourth, VIKOR with v = 0.5 ranks A fifth, and both select {B, C, E}.

Table 1. Scores and aggregated values (equal weights, scale 0–10, k = 3, v = 0.5)

Candidate	Security	Programming	Communication	SAW	TOPSIS C	S	R	Q
A	3	9	9	0.700	0.482	0.300	0.233	0.500
B	7	7	7	0.700	0.587	0.300	0.100	0.000
C	8	8	5	0.700	0.571	0.300	0.167	0.250
D	6	6	6	0.600	0.391	0.400	0.133	0.425
E	9	5	6	0.667	0.554	0.333	0.167	0.350
F	5	6	5	0.533	0.257	0.467	0.167	0.750

A enters the shortlist at a security score of 2.1 under SAW and of 3.8 under TOPSIS (Fig. 1; ranks computed by Eqs. (1), (2) and (4)). In this example, under VIKOR the veto threshold is 5.1 at v = 0, 4.1 at v = 0.5 and 2.1 at v = 1, where VIKOR gives the SAW threshold, and TOPSIS corresponds to v = 0.55. These values belong to this set of six candidates with k = 3 and are not general properties of the methods, because the normalisation in Eq. (4) and in TOPSIS uses the whole candidate set. What carries over is the mechanism. For a given candidate pool a recruiter can compute the threshold as a function of v and choose v so that it matches a stated requirement, for example 4 out of 10 on information security.

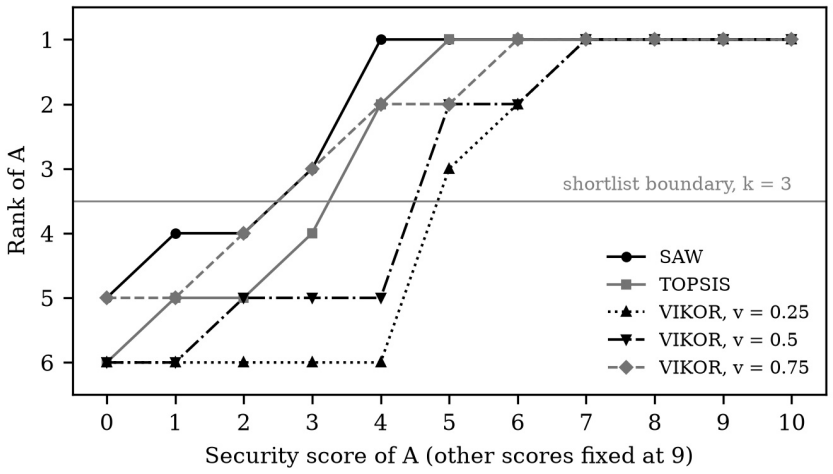


Figure 1. Rank of A against its security score under SAW, TOPSIS and VIKOR, k = 3

3.2. Randomized study

Instances had a median of 34.5 candidates, and the most valuable query concerned a borderline candidate in 97.8 % of them (Table 2). Borderline candidates are identified by P_i from Eq. (5), which the heuristic also uses. In Table 2, VoI, MI and IG are computed by Eqs. (6), (7) and (8), respectively, and MI_1 is the single-pass estimate of Eq. (7).

Table 2. Choice of one query in 500 random instances (k = 5, v = 0.5, median ρ with VoI)

Measure	ρ, all queries	ρ, borderline	Top = top-VoI	Mean value loss	Relative value loss, mean (median)
VoI (reference)	1	1	100%	0	0% (0%)
IG	0.04	0.27	1.8%	0.131	96.2% (100%)
MI, nested	0.63	0.81	76.8%	0.0067	5.2% (0%)
MI_1, single pass	0.21	0.66	76.4%	0.0067	5.3% (0%)
Heuristic	0.19	0.26	24.0%	0.081	60.5% (81.4%)

IG was nearly unrelated to VoI over all queries and only weakly related among borderline candidates, while MI agreed closely with VoI. MI_1 ranked the many zero-value queries less consistently, and its correlation with VoI over all queries was 0.21 against 0.63 for nested MI. It chose the same top query as nested MI in 91.2 % of instances and the most valuable query in 76.4 %. The first figure describes agreement with nested MI and the second agreement with the reference VoI, so MI_1 is suited to choosing the single query to verify rather than to ordering the whole list of queries. Re-estimation of the first 100 instances with 2,000 outer and 4,000 inner draws gave a mean paired value loss of 0.0060 (SE 0.0002) for MI, 0.083 (SE 0.0003) for the heuristic and 0.134 (SE 0.0003) for IG. On one thread of an Intel Xeon virtual machine the median time per instance was 0.003 s for IG, 0.006 s for the heuristic, 0.054 s for MI_1 and 11.4 s for nested VoI, so MI_1 was about 200 times faster than nested VoI. This ratio compares MI_1 with nested VoI, not with nested MI.

The scope of these results is set by the design of the randomized study. The scores were produced by a synthetic generator, and results are reported for one configuration, k = 5, v = 0.5 and n = 4. Answers to queries were assumed exact, scores of different candidates and criteria independent and weights fixed, a single query was chosen, and verification had no cost. Within this scope the comparison isolates the effect of what a measure refers to. Correlated scores, noisy answers, sequences of queries and query costs change the inputs of the measures rather than their definitions and can be studied with the same procedure.

4. Conclusion

In the six-candidate example VIKOR, unlike SAW, penalised a critical weakness, and its parameter v set a veto threshold between 5.1 and 2.1 on a ten-point scale. These values depend on the candidate set, but the threshold can be computed for any pool, which gives the recruiter an interpretable way to choose v. For the choice of one verification query the decisive property of a measure was whether it refers to the shortlist. The mutual information lost about 5 % of the

attainable value, while the entropy of the queried score lost most of it. Its single-pass estimate MI_1 was about 200 times faster than nested VoI and chose the same top query as nested MI in 91.2 % of instances, but its rank correlation with VoI over all queries was only 0.21. MI_1 is therefore recommended for choosing the single query to verify when many candidates are screened, not for ranking all possible queries. The findings refer to a synthetic study with exact answers, independent scores and one query.

References

1. Alguliyev R.M., Aliguliyev R.M., Mahmudova R.S. Multicriteria personnel selection by the modified fuzzy VIKOR method // The Scientific World Journal. – 2015. – Vol. 2015. – Art. 612767. – DOI: 10.1155/2015/612767.
2. Aydogan E.K., Ozmen M. The stochastic VIKOR method and its use in reverse logistic option selection problem // RAIRO – Operations Research. – 2017. – Vol. 51, No. 2. – P. 375–389. – DOI: 10.1051/ro/2016027.
3. Choudhury D., Williamson S., Golinski A., Miao N., Bickford Smith F., Kirchhof M., Zhang Y., Rainforth T. BED-LLM: Intelligent information gathering with LLMs and Bayesian experimental design // International Conference on Learning Representations (ICLR). – 2026. – DOI: 10.48550/arXiv.2508.21184.
4. Dubois D. Possibility theory and statistical reasoning // Computational Statistics & Data Analysis. – 2006. – Vol. 51, No. 1. – P. 47–69. – DOI: 10.1016/j.csda.2006.04.015.
5. Howard R.A. Information value theory // IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics. – 1966. – Vol. 2, No. 1. – P. 22–26. – DOI: 10.1109/TSSC.1966.300074.
6. Hwang C.-L., Yoon K. Multiple Attribute Decision Making. Methods and Applications. A State-of-the-Art Survey. Berlin, Heidelberg: Springer, 1981. (Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, Vol. 186). – DOI: 10.1007/978-3-642-48318-9.
7. López-González A., Babiloni E., Canós-Darós L. Multi-criteria decision-making methods applied to personnel selection: A systematic literature review // Universidad y Empresa. – 2026. – Vol. 28, No. 50. – P. 1–40. – DOI: 10.12804/revistas.urosario.edu.co/empresa/a.14895.
8. Mandi J., Kotary J., Berden S., Mulamba M., Bucarey V., Guns T., Fioretto F. Decision-focused learning: Foundations, state of the art, benchmark and future opportunities // Journal of Artificial Intelligence Research. – 2024. – Vol. 80. – P. 1623–1701. – DOI: 10.1613/jair.1.15320.
9. Opricovic S., Tzeng G.-H. Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS // European Journal of Operational Research. – 2004. – Vol. 156, No. 2. – P. 445–455. – DOI: 10.1016/S0377-2217(03)00020-1.
10. Xu C., Zhong P., Zhu F., Li L., Lu Q., Yang L. Stochastic multi-criteria decision making framework based on SMAA-VIKOR for reservoir flood control operation // Hydrological Sciences Journal. – 2023. – Vol. 68, No. 6. – P. 886–901. – DOI: 10.1080/02626667.2022.2154161.

Received: 09.11.2026
Accepted: 15.11.2026
Published: 28.11.2026

УДК 549.6+548

Solid solutions in alkaline-earth titanosilicate systems: synthesis, properties and phase relations (a review)

Masobirova Dilnoza Isroil qizi
Assistant
Fergana State Technical University
Republic of Uzbekistan, Fergana
E-mail: dilnozisroilnovna@gmail.com

Mirsalimova Saodat Raxmatjanovna
candidate of Chemical Sciences, Professor
Fergana State Technical University
Republic of Uzbekistan, Fergana

Kadyrova Zulayxa Raimovna
doctor of Chemical Sciences, Professor
Institute of General and Inorganic Chemistry of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Твёрдые растворы в титаносиликатных системах щёлочноземельных элементов: синтез, свойства и фазовые соотношения (обзор)

Масобирова Дилноза Исроил кизи
ассистент
Ферганский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Фергана

Мирсалимова Саодат Рахматжановна
канд. хим. наук, проф.
Ферганский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Фергана

Кадырова Зулайха Раимовна
д-р хим. наук, проф.
Институт общей и неорганической химии Академия наук Республики Узбекистан
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Библиографическое описание: Масобирова Д.И. кизи, Мирсалимова С.Р., Кадырова З.Р. Твёрдые растворы в титаносиликатных системах щёлочноземельных элементов: синтез, свойства и фазовые соотношения (обзор) // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23739

For citation: Masobirova D.I.Q., Mirsalimova S.R., Kadyrova Z.R. Solid solutions in alkaline-earth titanosilicate systems: synthesis, properties and phase relations (a review) // Universum: Technical Sciences : electronic scientific journal. 2026. No. 11(152). Available at: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23739

Abstract

Titanosilicates of the alkaline-earth elements – titanite $CaTiSiO_5$ and fresnoite-type $Ba_2TiSi_2O_8$ and $Sr_2TiSi_2O_8$ – are the basis of ceramic, glass-ceramic, piezoelectric and dielectric materials and of matrices for radioactive waste immobilization, but data on the synthesis of their solid solutions and on phase relations are scattered. The aim of this review is to analyze 21 key studies of 2017–2026 on the synthesis, properties and phase relations of solid solutions in the MgO, CaO, SrO, $BaO–TiO_2–SiO_2$ systems, with priority given to the works of scientists of Uzbekistan. The sources were selected by keywords in peer-reviewed journals and compared by aim, methods, results and limitations. Uzbek researchers compared titanite synthesis routes (co-precipitation, sol-gel, combustion), developed low-temperature syntheses of calcium silicate and aluminate phases and obtained barium titanate in a solar furnace. Foreign studies show that thermodynamic databases do not reliably predict the titanite field, that the oxygen potential changes the phase composition of the $CaO–SiO_2–TiO_2$ system, that the glass-crystalline route lowers the titanite formation temperature by about 400 °C, and that the single-phase region of the $(Ba,Sr)_2TiSi_2O_8$ ceramic solid solution is limited ($SrTiO_3$ separates at $x \geq 0.8$). Subsolidus phase relations and cation solubility limits in titanite and fresnoite require systematic study and comparison with thermodynamic models.

Аннотация

Титаносиликаты щёлочноземельных элементов – титанит $CaTiSiO_5$ и фреснойты $Ba_2TiSi_2O_8$ и $Sr_2TiSi_2O_8$ – служат основой керамических, стеклокристаллических, пьезоэлектрических и диэлектрических материалов, а также матриц для иммобилизации радиоактивных отходов, однако сведения о синтезе их твёрдых растворов и фазовых соотношениях разрознены. Цель обзора – проанализировать 21 ключевую работу 2017–2026 гг. о синтезе, свойствах и фазовых соотношениях твёрдых растворов в системах MgO, CaO, SrO, $BaO–TiO_2–SiO_2$ с приоритетным рассмотрением работ учёных Узбекистана. Источники отобраны по ключевым словам в рецензируемых журналах и сопоставлены по цели, методам, результатам и ограничениям. Исследователи Узбекистана сравнили способы синтеза титанита (соосаждение, золь-гель, горение), разработали низкотемпературный синтез фаз силикатов и алюминатов кальция и получили титанат бария в солнечной печи. Зарубежные работы показывают, что термодинамические базы данных ненадёжно предсказывают поле титанита, кислородный потенциал изменяет фазовый состав системы $CaO–SiO_2–TiO_2$, стеклокристаллический метод снижает температуру образования титанита примерно на 400 °C, а область однофазности керамического твёрдого раствора $(Ba,Sr)_2TiSi_2O_8$ ограничена (при $x \geq 0,8$ выделяется $SrTiO_3$). Субсолидусные фазовые соотношения и пределы растворимости катионов в титаните и фреснойте требуют систематического изучения и сопоставления с термодинамическими моделями.

Keywords: titanite, fresnoite, titanosilicates, alkaline-earth elements, solid solutions, phase relations, synthesis.

Ключевые слова: титанит, фреснойт, титаносиликаты, щёлочноземельные элементы, твёрдые растворы, фазовые соотношения, синтез.

Introduction

Titanite $CaTiSiO_5$ is considered a host material for ceramics and for immobilization of radioactive waste [12], whereas fresnoite-type $Ba_2TiSi_2O_8$ and $Sr_2TiSi_2O_8$ are polar crystals that retain piezoelectric properties at high temperatures and can be produced as oriented glass-ceramics [14; 6]. Isomorphous substitution of Mg^{2+}, Ca^{2+}, Sr^{2+} and Ba^{2+} makes it possible to tune these properties, which requires knowledge of phase diagrams. The purpose of this review is to analyze the key studies of 2017–2026 on the synthesis, properties and phase relations of alkaline-earth titanosilicate solid solutions, giving priority to the works of scientists of Uzbekistan, and to formulate unresolved problems.

Materials and methods

Peer-reviewed journal articles of 2017–2026 were searched in English and Russian by keywords (titanite, sphene, fresnoite, $CaO–SiO_2–TiO_2$, phase equilibria, solid solution, glass-ceramics), with a separate search for works of scientists of Uzbekistan. Twenty-one sources with verified bibliographic data were selected and analyzed by aim, methods, results and limitations.

Results and discussion

1. Studies of scientists of Uzbekistan

J. Khonimkulov, F. Homidov and Z.R. Kadyrova compared co-precipitation, sol-gel and combustion syntheses of titanite $CaTiSiO_5$ [9]. In all routes amorphous powders crystallized on calcination through intermediate phases; single-phase titanite formed at about 1200 °C in the sol-gel and combustion routes, while the co-precipitated powder sintered at 1250 °C for 2 h reached about 98 % of theoretical density [9]. The incorporation of other alkaline-earth cations into titanite was not considered.

Z.R. Kadyrova et al. obtained anorthite ceramics from loess loam using calcium-rich by-products of sugar production as mineralizers; anorthite formed at 950–1100 °C [7]. F.G. Khomidov and Z.R. Kadyrova showed that in the sol-gel synthesis of calcium monoaluminate at 1000 °C about 1.5 wt.% Eu_2O_3 reduces the formation time from 4 to 1 h, whereas Nd_2O_3 has the same effect only at about 5 wt.% [8]. M.S. Payzullakhanov, A.A. Kholmatov and M.M. Sobirov melted $TiO_2–BaCO_3$ mixtures in a solar furnace at 100–300 W/cm^2; slowly cooled melts crystallized as tetragonal $BaTiO_3$, and the highest permittivity (about 2800) was obtained at $BaO:TiO_2$ = 2.5:1 [13]. D.U. Tulyaganov et al. reviewed $CaO–MgO–SiO_2$ glass-ceramics, using the phase diagram as a guide for choosing compositions [17].

2. Thermodynamic description of alkaline-earth titanosilicate systems

L. Ye et al. proposed a CALPHAD description of the central $CaO–TiO_2–SiO_2$ system; the calculated transition temperature (486 K) and melting point (1669 K) of titanite agree with measurements, but only the α and β polymorphs were modeled [20]. M. Ilatovskaia et al. constructed isothermal sections of the $MgO–TiO_2–SiO_2$ system at 1523–1773 K and found a solid-

state invariant reaction involving $MgTi_2O_5$, SiO_2, $MgSiO_3$ and TiO_2 at about 1625 K [5]. A. Shukla et al. optimized the $BaO–SiO_2$ and $BaO–CaO–SiO_2$ systems using the modified quasichemical model [16]. A database covering all alkaline-earth titanosilicate solid solutions does not yet exist.

3. Experimental phase equilibria in the $CaO–SiO_2–TiO_2$ system

Phase relations in $CaO–SiO_2–TiO_2$-based systems were studied by equilibration, quenching and SEM-EDS (Table 1). The addition of 15 wt.% Al_2O_3 at 1400 °C in air expands the perovskite field, and neither MTDATA nor FactSage predicts sphene as a primary phase [19]. Lowering $p(O_2)$ to 10^{-10} atm enlarges the liquid region and the perovskite field [18], while at 10^{-16} atm Ti_3O_5 and $3CaO·Ti_3O_5$ become stable and the liquid region contracts [15]. In the $CaO–SiO_2–TiO_2–Al_2O_3–MgO$ system a pseudobrookite solid solution coexists with the liquid, and FactSage does not predict its field at 1300 °C [1].

Table 1. Experimental studies of phase equilibria in CaO–SiO2–TiO2-based systems

System	Conditions	Phases coexisting with liquid / main result	Ref.
$CaO–SiO_2–TiO_2$–15% Al_2O_3	1400 °C, air	Tridymite, rutile, perovskite; perovskite field expands; sphene not predicted by MTDATA	[19]
$CaO–SiO_2–TiOx$	1400 °C, $p(O_2)$ = 10^{-10} atm	Perovskite, wollastonite, rutile, silica; liquid region expands	[18]
$CaO–SiO_2–Ti_3O_5$	1400 °C, $p(O_2)$ = 10^{-16} atm	Ti_3O_5, $3CaO·Ti_3O_5$, SiO_2, $CaSiO_3$; liquid region contracts	[15]
$CaO–SiO_2–TiO_2–Al_2O_3–MgO$	1250–1400 °C, air	Silica, rutile, pseudobrookite solid solution; field not predicted by FactSage at 1300 °C	[1]

These data concern liquid–solid equilibria above 1250 °C; the titanite field and the subsolidus region remain insufficiently studied.

4. Synthesis and stability of titanite

J. Maletaškić et al. melted a $CaCO_3–TiO_2–SiO_2$ mixture at 1400 °C and obtained single-phase sphene glass-ceramics after heat treatment at 800 °C for 4 h [12], i.e. about 400 °C lower than via the sol-gel and combustion routes [9]. In $CaO–MgO–TiO_2–SiO_2$ glass-ceramics sinter-crystallized at 800–950 °C, diopside was the main phase and titanite appeared only at high TiO_2 contents; the samples reached about 99 % relative density with εr ≈ 6.8–9.4 [11].

5. Fresnoite-type solid solutions and alkaline-earth titanates

C. Jiang et al. grew $Ba_2TiSi_2O_8$ single crystals by the Czochralski method; their elastic compliance varies by only about 6 % between 20 and 700 °C [6]. Z. Yu et al. studied Sr substitution in $Ba_2TiSi_2O_8$ ceramics over x = 0–1.6: all compositions retained the tetragonal P4bm structure; at x = 0.4 a single-phase ceramic with εr′ = 12.53 and Q×f = 2120 GHz was obtained, whereas at x ≥ 0.8 $SrTiO_3$ separated and dielectric loss increased [21]. Hence the single-phase region of the $(Ba,Sr)_2TiSi_2O_8$ solid solution in ceramics is limited.

In Sr–Ti–Si–K–Al–O glasses crystallized at 850–950 °C, Sr-fresnoite was the only crystalline phase, with surface crystallization and d_{33} up to about 12 pC/N [14]. Replacing 10 at.% Sr by Ba preserved the (00l) orientation to a depth of more than 1 mm [2], and CaO and Na_2O additions changed the crystallization mechanism [3]. In a $Na_2O–BaO–TiO_2–B_2O_3–SiO_2–Al_2O_3$ glass annealed at 650 °C only $BaTiO_3$ formed after 1 h, and fresnoite appeared after 3 h or more [4]. A.N. Khrustalev et al. determined the solubility regions of solid solutions in the $BaTiO_3–CaTiO_3–SrTiO_3$ system [10].

6. Comparative analysis and unresolved problems

Table 2 shows that the formation temperature of a phase depends strongly on the synthesis route: melt-based methods give metastable states and oriented textures, whereas ceramic routes reveal the true solubility limits of solid solutions. Unresolved problems include the subsolidus phase relations of titanite and fresnoite with other alkaline-earth cations and the unreliable description of titanosilicates in thermodynamic databases.

Table 2. Comparison of synthesis routes for alkaline-earth silicate, titanate and titanosilicate phases

Route	Phase	Conditions and result	Ref.
Co-precipitation, sol-gel, combustion	$CaTiSiO_5$	Single phase at ~1200 °C (sol-gel, combustion); ~98% density after 1250 °C, 2 h (co-precipitation)	[9]
Glass-crystalline	$CaTiSiO_5$	Melting at 1400 °C; single-phase sphene at 800 °C, 4 h	[12]
Melting in a solar furnace	$BaTiO_3$	100–300 W/cm^2; quenching gives amorphous fine-grained product, slow cooling gives tetragonal $BaTiO_3$	[13]
Sinter-crystallization of glass	Diopside + titanite	800–950 °C; ~99% density at 800 °C	[11]
Ceramic (solid-state)	$(Ba,Sr)_2TiSi_2O_8$	Single phase at x = 0.4; $SrTiO_3$ at x ≥ 0.8	[21]
Czochralski growth	$Ba_2TiSi_2O_8$	Elastic compliance changes by ~6% at 20–700 °C; low-expansion cut up to 650 °C	[6]

Conclusion

Scientists of Uzbekistan have developed routes for titanite synthesis, low-temperature synthesis of calcium silicate and aluminate phases, and solar-furnace synthesis of barium titanate. Foreign studies have established thermodynamic descriptions of the key oxide systems and the effect of the oxygen potential, additives and Sr–Ba substitution on phase composition and properties. The priority tasks are the synthesis of titanite and fresnoite solid solutions by solid-state and glass-crystalline routes, experimental determination of phase relations and cation solubility limits, and comparison of the results with thermodynamic models.

References

1. Chen M., Shi J., Taskinen P., Jokilaakso A. Phase equilibria of the $CaO–SiO_2–TiO_2–Al_2O_3–MgO$ system in air at 1250–1400 °C // Ceramics International. – 2020. – Vol. 46, No. 17. – P. 27702–27710. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2020.07.268.
2. Gonon M., Dupla F., Alhousseini H. et al. Effect of partial Ba substitutions on the crystallization of $Sr_2TiSi_2O_8$ (STS) glass–ceramics and on the generation of a SAW signal at high temperatures // Materials. – 2021. – Vol. 14, No. 16. – Art. 4648. – DOI: 10.3390/ma14164648.
3. Gonon M., Satha S., Zanin T. et al. $Sr_2TiSi_2O_8$ (STS) polar glass-ceramics: effect of Na_2O and CaO additions in the parent glass on the crystallization mechanism and on the piezoelectric properties // Ceramics. – 2023. – Vol. 6, No. 1. – P. 1–15. – DOI: 10.3390/ceramics6010001.
4. Harizanova R., Wisniewski W., Avdeev G., Rüssel C. Crystallization and growth morphology of barium titanate and fresnoite from a glass with the composition $20.1Na_2O·23.1BaO·23TiO_2·9.8B_2O_3·21SiO_2·3Al_2O_3$ // CrystEngComm. – 2017. – Vol. 19, No. 41. – P. 6208–6214. – DOI: 10.1039/C7CE01339F.
5. Ilatovskaia M., Treichel A., Fabrichnaya O. The $MgO–TiO_2–SiO_2$ system: experiments and thermodynamic assessment // Journal of the American Ceramic Society. – 2023. – Vol. 106, No. 12. – P. 7704–7727. – DOI: 10.1111/jace.19365.
6. Jiang C., Chen F., Yu F. et al. Thermal expansion and electro-elastic features of $Ba_2TiSi_2O_8$ high temperature piezoelectric crystal // Crystals. – 2019. – Vol. 9, No. 1. – DOI: 10.3390/cryst9010011.
7. Kadyrova Z.R., Kuryazov Z.M., Babaev Z.K., Dzhabberganov D.S. Anorthite ceramic based on loess loam // Glass and Ceramics. – 2021. – Vol. 78, No. 7. – P. 337–341. – DOI: 10.1007/s10717-021-00406-9.
8. Khomidov F.G., Kadyrova Z.R. Sol-gel synthesis and effects of neodymium and europium oxides on the structuring of calcium monoaluminate // Glass and Ceramics. – 2024. – Vol. 80, No. 11. – P. 529–534. – DOI: 10.1007/s10717-024-00647-4.
9. Khonimkulov J., Homidov F., Kadyrova Z.R. [Synthesis methods and temperature effects on titanite microstructure] // Universum: tekhnicheskie nauki. – 2024. – No. 3 (120). – P. 18–21. – URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/17002 (accessed: 08.11.2026). (In Russ.).
10. Khrustalev A.N., Bazarova V.E., Verkhova E.D. et al. Dielectric properties of solid solutions of alkaline earth metal titanates of perovskite structure // Glass and Ceramics. – 2025. – Vol. 82, No. 5. – P. 204–212. – DOI: 10.1007/s10717-025-00773-7.
11. Kiani Zitani M., Banijamali S., Rüssel C. et al. Concurrent sinter-crystallization and microwave dielectric characterization of $CaO–MgO–TiO_2–SiO_2$ glass-ceramics // Journal of Asian Ceramic Societies. – 2020. – Vol. 8, No. 2. – P. 234–244. – DOI: 10.1080/21870764.2020.1725258.
12. Maletaškić J., Todorović B., Gilić M. et al. Synthesis and characterization of monophase $CaO–TiO_2–SiO_2$ (sphene) based glass-ceramics // Science of Sintering. – 2020. – Vol. 52, No. 1. – P. 41–52. – DOI: 10.2298/SOS2001041M.

13. Payzullakhanov M.S., Kholmatov A.A., Sobirov M.M. [Barium and strontium titanates synthesized in a solar furnace] // Universum: tekhnicheskie nauki. – 2020. – No. 6 (75). – P. 49–56. – URL: https://7universum.com/en/tech/archive/item/9588 (accessed: 08.11.2026). (In Russ.).
14. Renoirt M.-S., Maury N., Dupla F., Gonon M. Structure and properties of piezoelectric strontium fresnoite glass-ceramics belonging to the Sr–Ti–Si–Al–K–O system // Ceramics. – 2019. – Vol. 2, No. 1. – P. 86–97. – DOI: 10.3390/ceramics2010008.
15. Shi J., Qiu Y., Wan X. et al. Equilibrium phase relations of the $CaO–SiO_2–Ti_3O_5$ system at 1400 °C and a $p(O_2)$ of 10^{-16} atm // JOM. – 2022. – Vol. 74, No. 2. – P. 668–675. – DOI: 10.1007/s11837-021-05049-3.
16. Shukla A., Jung I.-H., Decterov S.A., Pelton A.D. Thermodynamic evaluation and optimization of the $BaO–SiO_2$ and $BaO–CaO–SiO_2$ systems // Calphad. – 2018. – Vol. 61. – P. 140–147. – DOI: 10.1016/j.calphad.2018.03.001.
17. Tulyaganov D.U., Dimitriadis K., Agathopoulos S., Fernandes H.R. Glasses and glass-ceramics in the $CaO–MgO–SiO_2$ system: diopside containing compositions – a brief review // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2023. – Vol. 612. – Art. 122351. – DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2023.122351.
18. Wan X., Shi J., Klemettinen L. et al. Equilibrium phase relations of $CaO–SiO_2–TiO_2$ system at 1400 °C and oxygen partial pressure of 10^{-10} atm // Journal of Alloys and Compounds. – 2020. – Vol. 847. – Art. 156472. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.156472.
19. Wan X., Shi J., Qiu Y. et al. The effect of 15 wt.% Al_2O_3 addition on the equilibrium phase relations of $CaO–SiO_2–TiO_2$ system at 1400 °C in air // Ceramics International. – 2021. – Vol. 47, No. 17. – P. 24802–24808. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2021.05.205.
20. Ye L., Li C., Wang Z. et al. Thermodynamic evaluation and optimization of the $CaO–TiO_2–SiO_2$ ternary system // Materials. – 2025. – Vol. 18, No. 19. – Art. 4448. – DOI: 10.3390/ma18194448.
21. Yu Z., Zhang X., Wu Y. et al. Effect of Sr doping on phase structure, microstructure, and dielectric properties of $Ba_2TiSi_2O_8$ ceramics // Journal of Materials Science: Materials in Electronics. – 2026. – Vol. 37, No. 1. – DOI: 10.1007/s10854-025-16381-8.

DIGITAL TRANSFORMATION OF INDUSTRIES

Received: 23.10.2026
Accepted: 29.10.2026
Published: 28.11.2026

УДК 004.6

Cross-level geographic attribution in china's 2025 5G factory register: a partial-identification audit of eight fuel-processing projects

Fu Shanning
PhD Student
Senior Engineer Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers National Research University
Uzbekistan, Tashkent
ORCID:0009-0007-3280-7991
E-mail: 1915105973@qq.com

Bekmuratov Dilshod Kasimovich[1]
PhD, Senior Lecturer
Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers National Research University
Uzbekistan, Tashkent
ORCID:0000-0001-8306-1500

Межуровневая географическая атрибуция в реестре 5G-заводов Китая за 2025 год: аудит восьми проектов по переработке топлива методом частичной идентификации

Фу Шаньнин
аспирант, PhD
старший инженер Национальный исследовательский университет Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Бекмуратов Дилшод Касимович[1]
PhD, старший преподаватель
Национальный исследовательский университет Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Библиографическое описание: Фу Ш., Бекмуратов Д.К. Межуровневая географическая атрибуция в реестре 5G-заводов Китая за 2025 год: аудит восьми проектов по переработке топлива методом частичной идентификации // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152).

For citation: Fu S., Bekmuratov D.K. Cross-level geographic attribution in china's 2025 5G factory register: a partial-identification audit of eight fuel-processing projects // Universum: Technical Sciences : electronic scientific journal. 2026. No. 11(152).

Abstract

Regional digital-transformation statistics can shift when a project's published province is replaced by the domicile of an associated company, even if both records are correct. We examine this cross-level attribution mechanism in all eight fuel-processing entries in China's 2025 5G Factory Register. The audit distinguishes the published project province (B1_pub), a dated corporate-province proxy defined by organizational role (B0), and applicant eligibility (B2). Five admissible links yield three branch-to-parent provincial differences and two same-company matches; three links remain unresolved. The feasible full-frame disagreement shares are therefore 37.5 %, 50 %, 62.5 % and 75 %, compared with 60 % among the five linked cases. The conceptual contribution is to distinguish a correct entity match from a valid geographic attribution: a corporate address may belong to the linked firm without representing the location of the project being counted. A role- and date-aware audit rule retains project geography for project counts and carries unresolved links into a discrete identified set. Reports from 2025 and a ministry casebook published in 2026 describe industrial-AI applications at enterprises associated with P01 and P04, while independently verified commissioning by the March 2025 application deadline remains undocumented. This framework clarifies how project geography, corporate domicile and programme-stage evidence should be combined in regional digital-policy measurement.

Аннотация

Региональные показатели цифровой трансформации могут изменяться, если опубликованную провинцию проекта заменить провинцией юридического адреса связанной с ним компании, даже когда оба источника содержат корректные сведения. Мы исследуем этот механизм межуровневой атрибуции на всех восьми проектах по переработке топлива из китайского реестра 5G-заводов за 2025 год. В аудите разграничены опубликованная провинция проекта (B1_pub), датированный корпоративный показатель провинции с учётом организационной роли (B0) и статус заявителя с точки зрения требований программы (B2). Для пяти допустимых связей выявлены три расхождения при сопоставлении филиала с материнской компанией и два совпадения при сопоставлении на уровне указанной компании; ещё три связи остаются неустановленными. Поэтому доля расхождений во всей совокупности может принимать значения 37,5 %, 50 %, 62,5 % и 75 %, тогда как среди пяти документально сопоставленных проектов она составляет 60 %. Концептуальный вклад состоит в различении корректности установления связи между объектами и обоснованности географической атрибуции: адрес связанной компании не обязательно характеризует местонахождение учитываемого проекта. Предложенный протокол, учитывающий организационную роль и дату источника, сохраняет проектную географию при подсчёте проектов, а неопределённость отсутствующих связей отражает в дискретном идентифицированном множестве. Публикации 2025 года и сборник министерства 2026 года описывают применение промышленного ИИ на предприятиях, связанных с P01 и P04, однако независимое подтверждение ввода систем в эксплуатацию к мартовскому сроку подачи заявок 2025 года отсутствует. Подход задаёт прозрачные правила совмещения сведений о географии проектов, корпоративной регистрации и этапах реализации программы в региональной статистике цифровизации.

Keywords: factory registers, geographic attribution, record linkage, industrial artificial intelligence, organizational role, partial identification, policy eligibility.

Ключевые слова: реестры заводов, географическая атрибуция, связывание записей, промышленный искусственный интеллект, организационный уровень, частичная идентификация, соответствие программе.

Funding: The study received no external funding.
Финансирование: исследование выполнено без внешнего финансирования.

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.
Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Acknowledgements: OpenAI’s ChatGPT was utilized in this study for literature searching, language polishing, Russian-to-English translation, and the formatting and layout of the manuscript. ChatGPT was not used as a primary source of evidence at the individual case level, nor was it employed as an independent tool for validating established case classifications. The researchers assume full responsibility for this study, the evidence used, and the final manuscript.

Благодарности: В данном исследовании ChatGPT компании OpenAI использовался для поиска литературы, языкового редактирования текста, перевода с русского языка на английский, а также для форматирования и вёрстки рукописи. ChatGPT не использовался в качестве первичного источника доказательств при анализе отдельных случаев и не применялся как независимый инструмент для проверки ранее установленных классификаций этих случаев. Исследователи несут полную ответственность за проведённое исследование, использованные доказательства и окончательный текст рукописи.

1. Introduction

Administrative records have become a common basis for mapping industrial digital transformation. A project register assigns a province to a listed project; corporate filings locate a legal entity, branch or parent. Combining the two sources can appear straightforward, yet the join may transfer a location attribute from one organizational unit to another. For a branch project, a parent company's domicile can be accurate as a corporate address and still be inappropriate for a regional project count [25, 29]. The resulting discrepancy is one of attribution, rather than necessarily one of inaccurate source data.

We use all eight fuel-processing entries in China's 2025 5G Factory Register to ask which unit each location field represents (RQ1), how role-specific joins affect provincial comparisons when some links are missing (RQ2), and what dated evidence supports about programme eligibility and industrial-AI activity (RQ3). The study distinguishes correctly matching an associated entity from attributing its address to the correct unit of analysis. We operationalize that distinction through a role- and date-aware coding rule, then use partial identification to preserve uncertainty from unresolved corporate links. The result is an auditable account of how linkage choices change the regional interpretation of otherwise valid records.

Research on multi-establishment firms shows that headquarters and production units occupy different places [1, 15]. Hu and colleagues document discrepancies between corporate registration and headquarters locations in listed-firm data [17, 18]. The statistical-business-register distinction between enterprises and local units [8], and establishment-linkage and geocoding research [21, 22], likewise makes the unit and address definition consequential. Recent asset-level mapping studies seek operational locations rather than relying on company-level counterparties [6]; research linking outlet-level mobility records to company financial data identifies additional risks from brand and corporate identifiers [16]. Record-linkage methods focus on whether records belong to the intended entity [5, 9]; newer flexible matching models address missing and imperfect identifiers [30]. Neither task alone establishes that an associated company's domicile is valid as a project's province. The present estimand is the difference induced by replacing the province published with a project by a pre-specified corporate domicile, not an error rate against observed plant sites.

The contribution is a post-linkage measurement rule for project-level geographic indicators. The audit (i) identifies the organizational level of each address, (ii) applies a dated documentary admissibility rule, and (iii) lists the finite-frame disagreement shares consistent with unresolved links [20, 24]. The identified set enumerates the feasible disagreement shares for the predefined eight-project frame without extrapolating to a broader population. The resulting protocol makes regional project-count interpretations reproducible when administrative and corporate records are joined.

Three distinct constructs structure the audit. B1_pub is the project province published in the MIIT register. B0 is a dated corporate-province proxy, drawn from the named company for company-labelled entries or from the listed parent's domicile for branch-labelled entries. B2 concerns the actual applicant and eligibility under programme rules. For a regional count keyed to the public project register, valid attribution means using the province assigned to that project. A linked firm's domicile answers a different question about corporate geography. Their comparison therefore measures sensitivity to cross-level substitution rather than competing estimates of the factory's physical site. Figure 1 maps the three fields and their evidentiary roles.

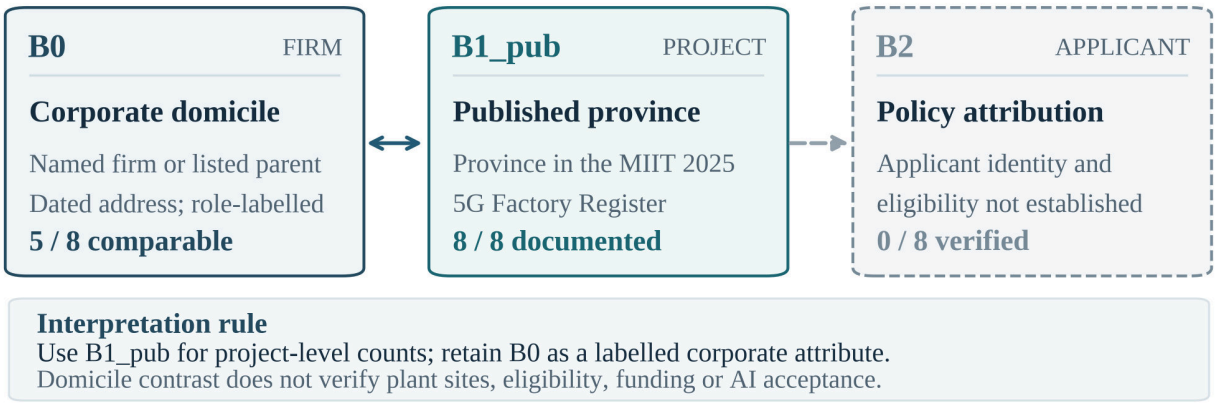


Figure 1. Analytical distinction among project province (B1_pub), dated corporate proxy (B0) and programme attribute (B2)

2. Materials and Methods

The fixed frame contains all eight petroleum, coal and other fuel-processing entries on page 6 of the final 2025 MIIT register: four in Hebei and one each in Liaoning, Fujian, Jiangxi and Shandong [25]. IDs P01–P08 are retained, including those without admissible corporate-address evidence. The national 2025 selection call states applicant requirements, but the published project list does not supply authenticated application forms linked to the eight cases [26].

This comparison is conditional on the predefined entity role. Let r_i indicate that both B0 and B1_pub provinces are documented, and d_i indicate a provincial difference when r_i=1. Equation (1) describes the documented-pair share, not a probability estimate for all projects. With k_D documented differences among N fixed projects and u unknown B0 comparisons, Equation (2) enumerates (k_D+j)/N for j=0,…,u. The resulting identified set follows the logic of reporting only values supported by observed information [20, 24]. Each value represents a logical completion of the eight project records; the set is not a confidence interval or a verification of physical plant locations.

$$D_{CC} = \frac{\sum_{i=1}^{8} r_i d_i}{\sum_{i=1}^{8} r_i} \tag{1}$$

$$S = \{ (k_D + j)/8 : j = 0, 1, \ldots, u \} \tag{2}$$

The audit followed five coding steps. First, each published MIIT entry was retained as one project record, with its reported province and a fixed ID P01–P08. Second, the construction actor was classified from the official name as a company or a branch; the branch and its listed parent were kept as distinct organizational units. Third, B0 was admitted only if an FY2024 or 2025 annual report, issuer filing or dated corporate notice supplied the province of the pre-specified comparison unit: the named company for a company entry, or the listed parent's domicile for a branch entry. Project-city text, an undated corporate contact address, and a lapsed historical legal-entity entry were not substituted for that evidence. Fourth, SAME was assigned when documented B0 and B1_pub provinces matched, DIFFER when they diverged, and UNKNOWN when admissible B0 was unavailable. Fifth, organizational role, source date and evidence identifier were retained in the eight-case audit dataset; missing B0 values were not filled from B1_pub.

The accepted B0 comparisons use P01's FY2024 subsidiary record filed on 11 April 2025, PetroChina's FY2024 report for P03 and P05 filed on 31 March, a 1 March 2025 issuer notice for P06, and Sinopec's FY2024 report filed on 23 March for P07, checked against a 7 April shareholder circular [3, 4, 23, 29, 31]. These documents establish the stated FY2024/2025 corporate proxy; a filing after the 31 March programme application deadline is not interpreted as direct confirmation of the registered address on that deadline. P02 has no admissible dated company address; P04's 2023 LEI entry is lapsed [2]; and P08 has contextual group information without a dated address for the named entity. All three are coded UNKNOWN under the same rule.

3. Results and Discussion

Of the eight projects, three are branch-labelled and five company-labelled; five have admissible B0 evidence. P01 and P06 retain the same provinces in B0 and B1_pub (Hebei and Fujian). For P03 and P05, PetroChina's Beijing parent domicile differs from the published project provinces, Hebei and Liaoning. P07 likewise pairs Sinopec's Beijing parent domicile with a Jiangxi project. Table 1 reports these role-specific comparisons. Figure 2 shows how the provincial distribution of the five documented projects changes when the corporate rather than project field is used for aggregation.

Table 1. Audited project–corporate provincial comparisons by organizational role

ID / project	B1_pub province	B0 corporate proxy	Comparison
P01 Xinxing Energy	Hebei	Hebei	SAME
P02 Hebei Kaiyi	Hebei	UNKNOWN	UNKNOWN
P03 Huabei Petrochemical	Hebei	Beijing (parent)	DIFFER
P04 Hebei Xinhai Chemical	Hebei	UNKNOWN	UNKNOWN
P05 Jinxi Petrochemical	Liaoning	Beijing (parent)	DIFFER
P06 Sinochem Quanzhou	Fujian	Fujian	SAME
P07 Jiujiang Petrochemical	Jiangxi	Beijing (parent)	DIFFER
P08 Qicheng Shandong	Shandong	UNKNOWN	UNKNOWN

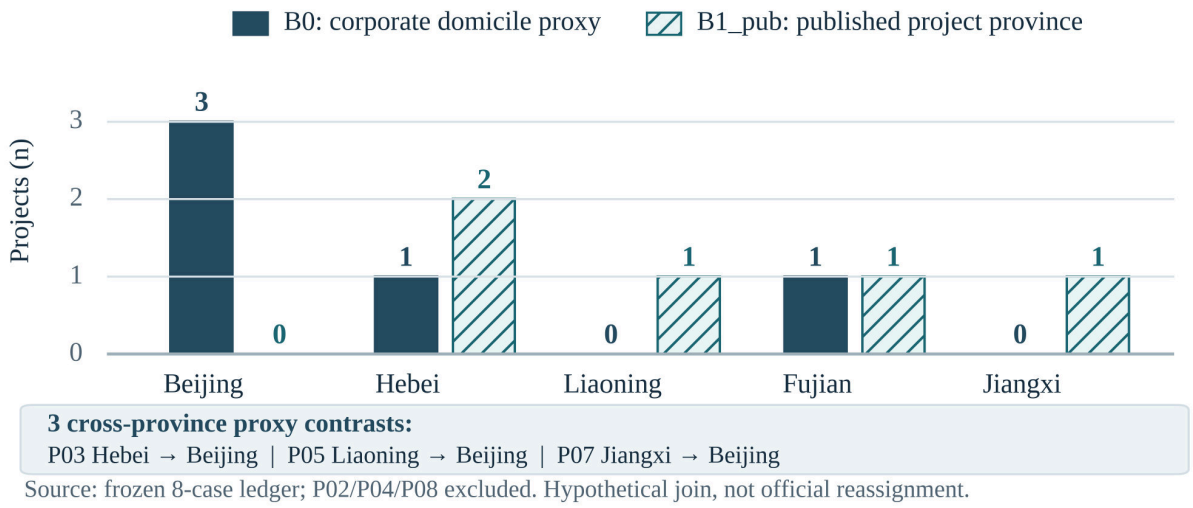
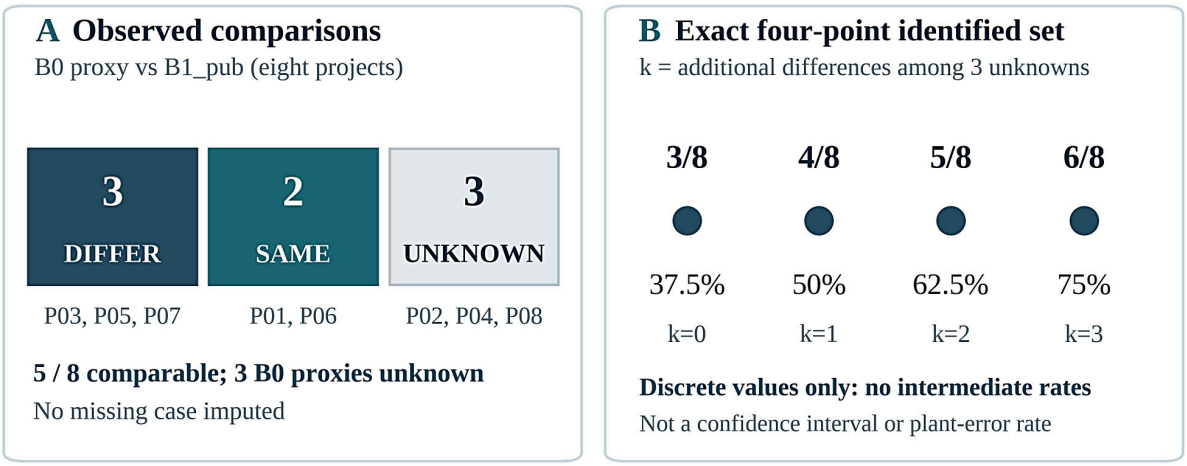


Figure 2. Sensitivity of the five documented project counts to substituting the role-specific corporate province

Among the five documented comparisons, three provinces differ and two agree (D_CC = 3/5 = 60 %). The remaining three projects lack admissible B0 evidence. Allowing zero, one, two or three additional differences produces a four-value full-frame identified set: 37.5 %, 50 %, 62.5 % and 75 % (Table 2; Figure 3). The 60 % figure is conditional on the documented links; the four feasible values capture what the entire eight-project frame supports.

Table 2. Exhaustive logical completions of the three unresolved B0 comparisons

Additional differences among unknowns	Different / 8	Feasible fraction
0	3 / 8	37.5%
1	4 / 8	50.0%
2	5 / 8	62.5%
3	6 / 8	75.0%



Source: frozen eight-case ledger (n=8); no imputation or population inference.

Figure 3. Evidence-state visualization of three differences, two agreements and three unresolved links

The selection notice specifies national application and local-recommendation rules [26]; the public register does not identify authenticated applicants for the eight projects. B2 consequently remains an applicant-level attribute, not an inference from B0 or B1_pub. The same attribution principle applies to evidence stages: nationwide eligibility rules do not establish applicant status for an individual project, and proposed incentives do not establish disbursement.

The 2026 MIIT raw-materials casebook describes machine-vision inspection in the P01 case (pp. 23–26) and predictive maintenance using LSTM and random-forest methods in the P04 case (pp. 14–17) [27]. One P01 installation is described prospectively and is classified as planned. Reports from 2025 describe coal-blending and predictive-maintenance applications associated with P01 [10, 14], and equipment-monitoring and visual-safety applications associated with P04 [11, 12, 28]. The evidence matrix records these as reported uses, with independent commissioning by the 2025 application deadline not established.

P08 appears in a secondary reproduction of a proposed incentive list, which does not document disbursement [7]. A 2024 provincial notice describes a different P04 digital-twin benchmark case [13], and the expired historical LEI entry for P04 [2] does not satisfy the B0 time rule. Table 3 lists the admissible inference for each evidence class; Figure 4 visualizes which case-level evidence fields are documented, rather than repeating Table 1's provincial comparison.

Table 3. Target attribute, documentary evidence and admissible inference

Target / construct	Evidence	Permitted inference
Project B1_pub vs. corporate B0	8 MIIT entries; 3 differ; 2 agree; 3 unknown	B1_pub for project counts; B0 sensitivity only
Plant site; applicant / B2	No verified sites or linked forms	Site unverified; eligibility undetermined
Industrial AI at P01/P04	2025 reports; 2026 MIIT casebook	Reported uses; timing unverified
P08 realized support	Secondary proposed-list copy	No confirmed award or payment

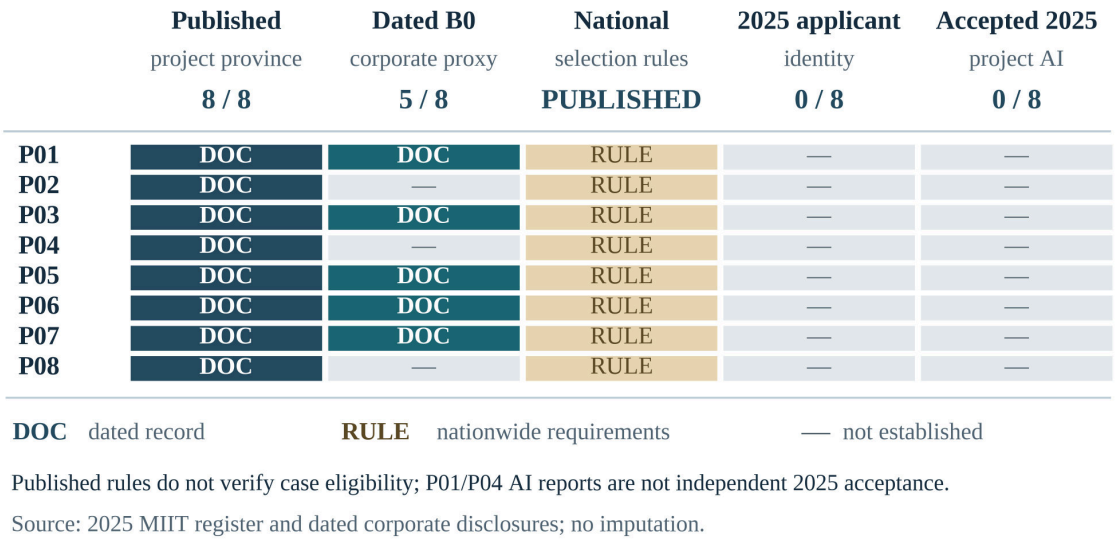


Figure 4. Case-level coverage of published project locations, dated corporate proxies, nationwide rules and independently documented programme stages

The closest studies address related but distinct measurement tasks. Hu et al. [17, 18] contrast registered and alternative headquarters locations, while Bartelme and Ziv [1] study the spatial organization of firms. Christiaen et al. [6] distinguish locations of operational assets from information about corporate counterparties; Hou et al. [16] discuss validation when linking place-level observations to company records. Spatial-proxy research also shows that substituting geographic representations can change measured variables [19], although centroid-based distances are different from the province-level substitutions studied here. Our audit fixes the project's published province and varies only the organizational level supplying a comparison address. The three DIFFER cases are branch-to-parent comparisons; the two SAME cases use the named-company level. P03 and P05 share a PetroChina parent, but represent two separate public projects, not independent parent firms.

The operational implication is to specify the target unit before joining its attributes. For an indicator defined as the count of published projects by province, retain B1_pub; for a corporate-domicile sensitivity exercise, use B0 only with the entity role and source date attached. An unresolved B0 should contribute to the discrete full-frame identified set instead of silently removing the project. The separate B2 applicant attribute and the AI-application evidence are a second illustration of the same rule: a published nationwide requirement, an enterprise use report, a

proposed award and an independently confirmed completion event correspond to different claims. By documenting those distinctions, the proposed protocol can be reused in other project–company registers even where the observed provincial proportions differ.

4. Conclusion

Regional project statistics depend on the organizational unit to which a location is attributed, not only on the accuracy of the address itself. Across eight fuel-processing entries in China's 2025 5G Factory Register, three documented branch-to-parent comparisons differ from the published project provinces, while two same-company comparisons agree. Three unresolved B0 links leave four feasible full-frame disagreement shares: 37.5 %, 50 %, 62.5 % and 75 %. The central conceptual finding is that an entity-correct record link need not be attribution-valid for a project-level indicator. A reproducible audit therefore begins with the target unit, keeps corporate role and source date attached to each join, and carries unresolved cases into an identified set. The evidence-stage audit also treats eligibility rules, reports of industrial-AI use and independently verified programme outcomes as distinct categories. The study demonstrates the approach in a fully enumerated, eight-project sectoral frame and provides a clear protocol for applying it to other project–company datasets.

References

1. Bartelme D., Ziv O. The internal geography of firms // Journal of International Economics. – 2024. – Vol. 148. – Art. 103889. – DOI: 10.1016/j.jinteco.2024.103889.
2. Bloomberg LEI. Hebei Xinhai huagong jituan youxian gongsi [Hebei Xinhai Chemical Group Co., Ltd.: LEI record]. – 20 February [Электронный ресурс]. – 2023. – URL: https://lei.bloomberg.com/leis/view/655600I0RTPZ3DFASH49 (accessed: 26.10.2026).
3. China Petroleum & Chemical Corporation. 2024 nian niandu baogao [2024 annual report]. – 23 March 2025.(In Chinese) [Электронный ресурс]. – URL: https://www1.hkexnews.hk/listedco/listconews/sehk/2025/0323/2025032300008_c.pdf (accessed: 26.10.2026).
4. China Petroleum & Chemical Corporation. Annual general meeting for 2024 and first H shareholders class meeting for 2025 [Shareholder circular]. – 7 April [Электронный ресурс]. – URL: https://www.hkexnews.hk/listedco/listconews/sehk/2025/0407/2025040701679.pdf (accessed: 26.10.2026).
5. Christen P. Data matching: Concepts and techniques for record linkage, entity resolution, and duplicate detection. – Berlin; Heidelberg: Springer, 2012. – XX, 272 P. – DOI: 10.1007/978-3-642-31164-2.
6. Christiaen C., Lockwood P., Jackman A., Caldecott B. Location, location, location: asset location data sources for nature-related financial risk analysis // Current Opinion in Environmental Sustainability. – 2025. – Vol. 74. – Art. 101527. – DOI: 10.1016/j.cosust. 2025.101527.

7. Dongying Municipal Bureau of Industry and Information Technology. Guanyu 2025 nian shuzi jingji lei shidian shifan xiangmu (di yi pi) ni jiangbu mingdan de gongshi [Public notice of the proposed incentive list for 2025 digital-economy pilot and demonstration projects (first batch)] [Электронный ресурс]. // Keceyun (reproduction). – URL: https://www.keceyun.com/policy/newsdetail/387725.html (accessed: 26.10.2026).
8. Eurostat (European Commission). European business statistics methodological manual for statistical business registers: 2021 edition. – Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2021. – 306 P. – DOI: 10.2785/093371.
9. Fellegi I.P., Sunter A.B. A theory for record linkage // Journal of the American Statistical Association. – 1969. – Vol. 64, No. 328. – P. 1183–1210. – DOI: 10.1080/01621459.1969.10501049.
10. Hebei Daily. Sishijiu ge gongye moxing, jiangben zengxiao xin mima [Forty-nine industrial models: A new formula for cost reduction and efficiency]. – 13 June 2025.(In Chinese) [Электронный ресурс]. – URL: https://www.hebtv.com/0/0rmhlm/qy/ms/xw/11901553.shtml (accessed: 26.10.2026).
11. Hebei Daily. Wei anquan shengchan zhuang shang chaoji zhihui danao [Equipping production safety with a super-intelligent brain]. – 13 June 2025.(In Chinese) [Электронный ресурс]. – URL: https://finance.sina.cn/2025-06-13/detail-inezwrzs6756481.d.html (accessed: 26.10.2026).
12. Hebei Daily. Chejian li de “zhibian” [Intelligent transformation on the factory floor]. – 21 November 2025.(In Chinese) [Электронный ресурс]. – URL: https://he.people.com.cn/n2/2025/1121/c192235-41418215.html (accessed: 26.10.2026).
13. Hebei Department of Industry and Information Technology. Guanyu 2024 nian Hebei sheng gongye hulianwang biaogan anli mingdan de gongshi [Public notice of the 2024 Hebei provincial industrial Internet benchmark-case list]. – 16 December 2024.(In Chinese) [Электронный ресурс]. – URL: https://gxt.hebei.gov.cn/hbgyhxxht/xwzx32/tzgg83/2025042121421087525/index.html (accessed: 26.10.2026).
14. Hebei Unicom. 5G funeng, lianjiao keyi hen “zhihui” [5G-enabled intelligent coking] [Электронный ресурс]. // Xinhua Silk Road. – 2025. – URL: https://www.imsilkroad.com/news/p/542870.html (accessed: 26.10.2026).
15. Henderson J.V., Ono Y. Where do manufacturing firms locate their headquarters? // Journal of Urban Economics. – 2008. – Vol. 63, No. 2. – P. 431–450. – DOI: 10.1016/j.jue.2007.02.006.
16. Hou Y., Poliquin C., Sakakibara M., Testoni M. Using smartphone location data for strategy research // Strategy Science. – 2025. – Vol. 10, No. 4. – P. 281–299. – DOI: 10.1287/stsc.2024.0317.
17. Hu G., Lu Y., Zhong Y. Qiye quwei shijiao xia de shuju wucha yanjiu: Yi A gu shangshi gongsi wei li [Errors in statistical data from the perspective of corporate location: A case study of A-share listed companies] // Progress in Geography. – 2023. – Vol. 42, No. 12. – P. 2309–2323. – DOI: 10.18306/dlkxjz.2023.12.003.
18. Hu G., Peng Z., Lu Y., Zhong Y. Misidentification of geographical location of companies and its influence on empirical research: A case study of A-share listed companies in Beijing // Progress in Geography. – 2025. – Vol. 44, No. 8. – P. 1635–1647. – DOI: 10.18306/dlkxjz.2025.08.006.

19. Kalay A.F., Wen H. Lost in aggregation: Quantifying measurement error from geographic centroids // Economic Record. – 2026. – Early View (published online 18 September 2026). – 30 P. (online version; journal page range not yet assigned). – DOI: 10.1111/1475–4932.70072.
20. Kline B., Tamer E. Recent developments in partial identification // Annual Review of Economics. – 2023. – Vol. 15. – P. 125–150. – DOI: 10.1146/annurev-economics-051520-021124.
21. Larsen M.D., Herning A. Record linkage for establishments: Background, challenges, and an example // Advances in Business Statistics, Methods and Data Collection / eds. G. Snijkers et al. – 2023. – P. 757–780. – DOI: 10.1002/9781119672333.ch33.
22. Lennert M. The use of exhaustive micro-data firm databases for economic geography: The issues of geocoding and usability in the case of the Amadeus database // ISPRS International Journal of Geo-Information. – 2015. – Vol. 4, No. 1. – P. 62–86. – DOI: 10.3390/ijgi4010062.
23. Luxi Chemical Group Co., Ltd. Guanyu 2025 niandu richang guanlian jiaoyi yuji de gonggao [Announcement on estimated routine related-party transactions in 2025] [Электронный ресурс]. // Shanghai Securities News. – URL: https://paper.cnstock.com/html/2025–03/01/content_2032262.htm (accessed: 26.10.2026).
24. Manski C.F. Partial identification of probability distributions. XII. – New York: Springer, 2003. – 179 P. – DOI: 10.1007/b97478.
25. Ministry of Industry and Information Technology of China. 2025 nian 5G gongchang minglu [2025 5G factory register].(In Chinese) [Электронный ресурс]. – URL: https://www.miit.gov.cn/cms_files/filemanager/1226211233/attach/20258/d329e22c513e4f63a54bb1cc1f1ca577.pdf (accessed: 26.10.2026).
26. Ministry of Industry and Information Technology of China. Guanyu zuzhi kaizhan 2025 nian 5G gongchang minglu xiangmu ji youxiu anli linxuan gongzuo de tongzhi [Notice on selecting 2025 5G factory register projects and exemplary cases]. – 10 March 2025.(In Chinese) [Электронный ресурс]. – URL: https://www.miit.gov.cn/jgsj/xgj/gzdt/art/2025/art_2089249b00684b2088ecd83d4f8373cc.html (accessed: 26.10.2026).
27. Ministry of Industry and Information Technology of China. 2025 nian 5G gongchang dianxing yingyong shijian (yuan cailiao gongye) [2025 5G factory typical application practices: Raw materials industry].(In Chinese) [Электронный ресурс]. – 2026. – URL: https://www.miit.gov.cn/cms_files/filemanager/1226211233/attach/20263/f911ca4f96534bc28427547fcf035c54.pdf (accessed: 26.10.2026).
28. People’s Daily Online Hebei. Xinhai huagong da moxing tongguo guojia beian [Xinhai Chemical’s large model completes national registration]. – 20 April 2025.(In Chinese) [Электронный ресурс]. – URL: https://he.people.com.cn/n2/2025/0420/c192235-41202163.html (accessed: 26.10.2026).
29. PetroChina Company Limited. 2024 nian niandu baogao [2024 annual report].(In Chinese) [Электронный ресурс]. – 2025. – URL: https://static.cninfo.com.cn/finalpage/2025-03-31/1222962164.PDF (accessed: 26.10.2026).

30. Robach K., van der Pas S.L., van de Wiel M.A., Hof M.H. A flexible model for record linkage // Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics). – 2025. – Vol. 74, No. 4. – P. 1100–1127. – DOI: 10.1093/jrsssc/qlaf016.
31. Xinxing Ductile Iron Pipes Co., Ltd. 2024 nian niandu baogao [2024 annual report]. – 11 April 2025.(In Chinese) [Электронный ресурс]. – URL: https://static.cninfo.com.cn/finalpage/2025-04-11/1223058153.pdf (accessed: 26.10.2026).

Received: 21.10.2026
Accepted: 01.11.2026
Published: 28.11.2026

УДК 622.24:004.8

DOI: 10.32743/UniTech.2026.152.11.23648

From human error to intelligent monitoring: the role of ai in reducing non-productive time in well construction

Hajibayova Nigar Karim
PhD, researcher
Azerbaijan State Oil and Industry University
Azerbaijan, Baku
ORCID: 0009-0008-0899-3760
E-mail: nigar.hb@gmail.com

От человеческой ошибки к интеллектуальному мониторингу: роль ИИ в сокращении непроизводительного времени при строительстве скважин

Гаджибекова Нигяр Керим
докторант
Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности
Азербайджанская Республика, Баку

Abstract

Non-productive time (NPT) is one of the largest controllable losses in well construction, yet its human causes are often recorded as technical failures such as stuck pipe or equipment breakdown. This article examines three causes of human error (lack of experience, a distracting rig environment, and fragmented communication), linking them to lost time through a model splitting error-induced NPT into detection, decision, and remediation components. The causes are illustrated with a case of premature liner-top packer activation on an offshore 193.7 mm (7 5/8 in) liner at about 5,685 m, preventing primary cementing and triggering a long and costly remedial sequence. The article argues that a centralized communication center with mandatory backup, even for proven low-risk operations, and a psychologically safe team are key defenses. It also shows how digital twins and artificial intelligence (AI) can support crews in distracting, high-pressure conditions by predicting expected parameter values and flagging early deviations from normal operation.

Библиографическое описание: Гаджибекова Н.К. От человеческой ошибки к интеллектуальному мониторингу: роль ИИ в сокращении непроизводительного времени при строительстве скважин // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23648

For citation: Hajibayova N.K. From human error to intelligent monitoring: the role of ai in reducing non-productive time in well construction // Universum: Technical Sciences : electronic scientific journal. 2026. No. 11(152). Available at: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23648

Аннотация

Непроизводительное время (НПВ) — одна из крупнейших контролируемых потерь при строительстве скважин, однако его человеческие причины часто фиксируются как технические отказы, например прихват бурового инструмента или поломка оборудования. В статье рассматриваются три причины человеческой ошибки (недостаток опыта, отвлекающая среда буровой установки и фрагментированная коммуникация) и устанавливается их связь с потерями времени с помощью модели, разделяющей НПВ, вызванное ошибкой, на время обнаружения, принятия решения и устранения. Причины иллюстрируются случаем преждевременного срабатывания пакера надфильтровой зоны (liner-top packer) на хвостовике диаметром 193,7 мм (7 5/8 дюйма) морской скважины на глубине около 5 685 м, что сделало невозможным первичное цементирование и повлекло длительную последовательность дорогостоящих ремонтных работ. Утверждается, что централизованный коммуникационный центр с обязательным резервированием, даже для проверенных операций с низким риском, и психологически безопасная команда являются ключевыми средствами защиты. Также показано, как цифровые двойники и искусственный интеллект (ИИ) могут поддерживать людей в отвлекающих условиях высокого давления, прогнозируя ожидаемые показатели параметров и выявляя ранние отклонения от нормального хода операции.

Keywords: liner hanger, digital twin, artificial intelligence, human error, non-productive time.

Ключевые слова: подвеска хвостовика, цифровой двойник, искусственный интеллект, человеческая ошибка, непроизводительное время.

Introduction

Drilling a deep offshore well is a sequence of tightly coupled operations carried out under time pressure, with incomplete downhole information and many contractors on the rig. Field studies commonly report non-productive time (NPT) of roughly 10–30 % of total well time.

NPT is usually classified by its technical cause, such as stuck pipe, lost circulation, or equipment failure, which describes how time was lost but not why. Investigations often find that the decisive factor was a human action or decision, as major offshore inquiries have shown (National Commission on the BP Deepwater Horizon Oil Spill and Offshore Drilling, 2011).

Theoretical Framework

Human errors include slips and lapses, mistakes in forming a plan, and violations of procedure, and usually arise from latent conditions such as generic procedures, unclear decision rights, or poor communication (Reason, 2016). Loss of situation awareness is common: analysis of the Deepwater Horizon crew showed how expectation, distraction, and experience can lead a competent crew to misread a well (Roberts, Flin and Cleland, 2015). The impact of an error depends mainly on what follows it: an error at an irreversible step, such as setting a hanger or pumping cement, forces recovery operations that each carry further risk, so most events cause minor delays while a few lose days or weeks.

Causes of Human Error in Drilling Operations

Lack of experience. Experience means exposure to a specific class of operations and their failure signatures. Without it, operators misread signals, repeat failing actions, and hesitate to stop the job.

Distracting environment. Rig noise, radio traffic, simultaneous operations (SIMOPS), visitors, status calls from shore, fatigue, and alarm flooding all compete for the attention that hanger setting, cementing, and pressure testing require, and vigilance falls over time.

Fragmented communication. When the rig crew, service companies, and onshore engineers each report through their own line, information is delayed, filtered, or lost, as happened in the case study. A centralized communication center, such as a real-time operations center, is the most effective answer: it puts all parties on one channel and one live data stream, speeds decisions, adds independent monitoring away from rig noise and fatigue, and keeps a clear decision record.

Backup from the center must be mandatory for every operation, not only for those rated high risk. Proven, low-risk operations are where complacency grows and small deviations come to be accepted as normal, so keeping a degree of “chronic unease” is a recognized safety skill (Flin and Fruhen, 2015).

Materials and Methods

Quantifying Error-Induced NPT

To link these causes to lost time, error-induced NPT for event i is split into three components:

$$t_{NPT,i} = t_{det,i} + t_{dec,i} + t_{rem,i} \quad (1)$$

where t_{det} is the detection time, t_{dec} the decision time until an approved recovery plan exists, and t_{rem} the remediation time.

Inexperience raises the chance of the initiating error and lengthens t_{det} and t_{rem}; distraction mainly lengthens t_{det}; fragmented communication mainly lengthens t_{dec}.

Case Study: Premature Activation of a Liner-Top Packer

In an offshore development well, a 193.7 mm (7 5/8 in), 58.0 kg/m (39 lb/ft) Q-125 liner was run on a hanger with an integral liner-top packer to about 5,685 m in 1.67 g/cm³ mud. Seven attempts were made to set the slips, each involving picking up to about 2,700 kN (275 tf), rotating at 20 rpm, and slacking off to 1,940–2,285 kN (198–233 tf), without a clear set indication. On the seventh, standpipe pressure rose from 2.13 to 3.09 MPa (21 to 30.5 atm), did not bleed off, and circulation was lost: the packer had set before the liner was cemented.

After a wait on decision, the packer was fully set and tested, but the formation integrity test (FIT) failed, and the retrieved running tool showed a dented pack-off and a torn bottom-plug rubber. With the annulus sealed, primary cementing was impossible, and a long remedial sequence followed (Table 1).

Table 1. Remedial sequence following premature packer activation

No.	Operation	Complication/consequence
1	Wait on decision; full packer set and test	NPT while the recovery plan was agreed between rig, service company and onshore
2	Formation integrity test	Failed; running tool damage found on surface
3	Repeat injection test; off-bottom cement job	Formation broke down; about 73 m³ of mud losses during the cement job; repeated annulus top-ups
4	Remedial cement squeeze	About 6.7 m³ of cement squeezed into the formation
5	Drill-out of cement, landing collar, float collar and shoe	Several runs with repeated reaming
6	Repeated FIT/leak-off tests with lost-circulation material (LCM) pills	One test failed with large pressure decline; blowout preventer (BOP) ram leak during a later test, rams replaced
7	Rig equipment	Drawworks brake failure caused further downtime

Results and Discussion

The investigation's root causes (incorrect assessment, poor communication, lack of competence, and procedure not followed) map onto the three causes above: seven attempts with varying parameters suggest trial and error, repeated load cycles erode vigilance, while the decisive pressure rise was only about 0.96 MPa, and the wait on decision corresponds to the t_{dec} term of Equation (1).

Mitigation Strategies

• **Competence:** verify it for the specific operation and tool through supervised runs, pre-job walkthroughs of expected signatures, digital-twin rehearsal, and joint crew resource management training (IOGP, 2014).

• **Attention:** apply a drilling version of aviation's sterile-cockpit rule during critical steps, with no non-essential radio traffic, SIMOPS, visitors, or status calls.

• **Communication:** run every operation through the centralized communication center, with closed-loop communication, contingency trees agreed in advance, and mandatory backup even for proven, low-risk operations.

• **Procedures:** state expected parameter ranges, a maximum number of attempts before reassessment, and responses to likely abnormal outcomes.

Centralized Teamwork and the Psychology of Error Prevention

The centralized communication center works best as part of one centralized team, in which the operator, contractor, service specialists, and onshore engineers share one plan, one live picture of the well, and one leader per critical step. A shared mental model means everyone expects the same response at each step, so several people notice a deviation at once (Salas, Reyes and McDaniel, 2018). Psychological safety, the belief that one can raise concerns without blame, lets a junior engineer stop a job despite steep authority gradients; explicit stop-work authority and a just culture support it (Edmondson, 2018; Dekker, 2014).

Teams also face biases under pressure. When many people watch, each may assume someone else will act, so responsibilities must be named. Stress encourages plan continuation, the tendency to keep pursuing a failing plan, which the seven near-identical setting attempts illustrate; a mandatory team review after a set number of attempts breaks it. Cohesive teams can also agree too quickly, so junior members should speak first at hold points.

Digital Twins and Artificial Intelligence as Defenses Against Human Error

A drilling digital twin is a physics-based model of the well, drill string, and downhole tools that runs alongside the operation, updated with live rig data (Grieves and Vickers, 2017; Wanasinghe et al., 2020). It predicts hook load, torque, and pressure at each step, and artificial intelligence (AI) models add pattern recognition, flagging signatures that resemble earlier failures. Before a job, rehearsal on the twin gives less experienced staff a library of expected signatures. During the job, software that does not tire can compare live data with the expected envelope, detect small trends such as a pressure rise of less than 1 MPa, suppress nuisance alarms, and count attempts.

A shared display gives everyone the same mental model, and an objective alert gives a junior engineer a neutral reason to speak up, since the challenge becomes “the model shows a deviation” rather than a personal one. In the case study, the twin could have flagged the deviation from the expected setting signature early, triggered a review well before the seventh attempt, and raised an immediate alert on the pressure rise from 2.13 to 3.09 MPa. Risks such as over-trust, alarm fatigue, and loss of manual skills mean these tools must support, not replace, competent people (Endsley, 2017).

Interaction of Causes and Limitations

The causes interact: an inexperienced operator is more easily distracted, and fragmented communication removes the support that would compensate, so these defenses should be treated as one system. Because the case is a single event, the benefits described here are expected rather than measured.

Conclusion

1. Human error is a major, under-reported driver of NPT, mostly through the remedial chain that follows it.

2. A centralized communication center, with mandatory backup even for proven low-risk operations, and a psychologically safe centralized team catch individual errors early.

3. Job-specific competence, protected attention, and procedures with attempt limits reduce the chance of error.

4. Digital twins and AI can predict expected signatures, provided they support rather than replace competent people.

References

1. Dekker, S. The Field Guide to Understanding «Human Error» / S. Dekker. – 3rd ed. – Farnham: Ashgate, 2014. – 248 P.

2. Edmondson, A.C. The Fearless Organization / A.C. Edmondson. – Hoboken, NJ: Wiley. – 2018. – 256 P.
3. Endsley, M.R. From here to autonomy: lessons learned from human–automation research / M.R. Endsley // Human Factors. – 2017. – Vol. 59, No. 1. – P. 5–27.
4. Flin, R. Managing safety: ambiguous information and chronic unease / R. Flin, L. Fruhen // Journal of Contingencies and Crisis Management. – 2015. – Vol. 23, No. 2. – P. 84–89.
5. Grieves, M. Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems / M. Grieves, J. Vickers // Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems / ed. by F.-J. Kahlen [et al.]. – Cham: Springer, 2017. – P. 85–113.
6. Crew Resource Management for Well Operations Teams: report № 501 / International Association of Oil & Gas Producers. – London: IOGP, 2014. – 36 P.
7. Deep Water: The Gulf Oil Disaster and the Future of Offshore Drilling: report / National Commission on the BP Deepwater Horizon Oil Spill and Offshore Drilling. – Washington, DC: U.S. Government Printing Office. – 2011. – 380 P.
8. Reason, J. Organizational Accidents Revisited / J. Reason. – Boca Raton, FL: CRC Press. – 2016. – 160 P.
9. Roberts, R. «Everything was fine»: an analysis of the drill crew's situation awareness on Deepwater Horizon / R. Roberts, R. Flin, J. Cleland // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. – 2015. – Vol. 38. – P. 87–100.
10. Salas, E. The science of teamwork: progress, reflections, and the road ahead / E. Salas, D.L. Reyes, S.H. McDaniel // American Psychologist. – 2018. – Vol. 73, No. 4. – P. 593–600.
11. Wanasinghe, T.R. Digital twin for the oil and gas industry: overview, research trends, opportunities, and challenges / T.R. Wanasinghe, L. Gosine, G. James [и др.] // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 104175–104197.

Received: 27.10.2026
Accepted: 12.11.2026
Published: 28.11.2026

УДК 504.3.054+66

DOI: 10.32743/UniTech.2026.152.11.23700

The impact of data transmission delays on the calculation of emission dispersion into the atmosphere at a metallurgical plant

Minnegaliev Timur Damirovich
4th-year student
Institute of Radio Electronics and Industrial Programming
MIREA – Russian Technological University
Russian Federation, Moscow
ORCID: 0009-0003-2280-443X
E-mail: tim4op@gmail.com

Влияние задержек передачи данных на расчет рассеивания выбросов в атмосферу на металлургическом предприятии

Миннегалиев Тимур Дамирович
студент
4 курса, Институт радиоэлектроники и промышленного программирования, МИРЭА – Российский технологический университет
Российская Федерация, г. Москва

Abstract

Metallurgical enterprises are significant sources of atmospheric air pollution. To enhance the effectiveness of environmental monitoring, automated systems are employed to collect data on emissions, which are then used to calculate the dispersion of pollutants. The reliability of these calculations depends not only on the accuracy of the instruments but also on the speed and completeness with which data reaches the processing system. This study aims to evaluate how data delays, losses, and inconsistencies in arrival times affect the accuracy of real-time pollutant dispersion modeling, and it proposes methods to mitigate such errors. The Magnitogorsk Iron and Steel Works serves as an example of an enterprise that utilizes digital tools for environmental monitoring. While actual data delays and losses at the facility were not measured, it is noted that at wind speeds ranging from two to five meters per second, an air mass can travel between 600 and 1,500 meters in five minutes. Although this estimate illustrates the scale of transport, it does not

Библиографическое описание: Миннегалиев Т.Д. Влияние задержек передачи данных на расчет рассеивания выбросов в атмосферу на металлургическом предприятии // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23700

For citation: Minnegaliev T.D. The impact of data transmission delays on the calculation of emission dispersion into the atmosphere at a metallurgical plant // Universum: Technical Sciences : electronic scientific journal. 2026. No. 11(152). Available at: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23700

quantify the model's margin of error. Proposed solutions include distributed processing, prioritized message transmission, time synchronization, and separate monitoring of real-time data availability versus archival data completeness. The study emphasizes the need to validate these proposals through retrospective modeling and by comparing calculated results against actual observations. These findings are preliminary and require further verification using the enterprise's own data, while accounting for the specific characteristics of the measuring instruments.

Аннотация

Металлургические предприятия относятся к значимым источникам загрязнения атмосферного воздуха. Для повышения эффективности экологического контроля применяются автоматизированные системы, которые собирают сведения о выбросах и используют их для расчета распространения загрязняющих веществ. Достоверность расчетов зависит не только от точности приборов, но и от того, насколько быстро и полно данные поступают в систему обработки. Целью данного исследования является оценка задержек, потерь и несогласованности времени поступления данных на точность оперативного определения зоны распространения загрязняющих веществ и предложение возможных способов уменьшения ошибок. Магнитогорский металлургический комбинат рассматривается как пример предприятия, применяющего цифровые средства экологического контроля. Фактические задержки и потери данных на предприятии не измерялись. Показано, что при скорости ветра от двух до пяти метров в секунду за пять минут воздушная масса перемещается на расстояние от шестисот до полутора тысяч метров. Эта оценка характеризует масштаб переноса, но не определяет погрешность модели. Предложены распределенная обработка, приоритетная передача сообщений, синхронизация времени и раздельный контроль оперативной доступности и архивной полноты данных. Обоснована необходимость проверки предложений посредством ретроспективного моделирования и сопоставления расчетных результатов с наблюдениями. Результаты имеют предварительный характер и требуют подтверждения на данных предприятия с учетом характеристик измерительных приборов.

Keywords: metallurgical plant, atmospheric air, automatic emission control, environmental monitoring, spread of pollutants, data transmission delay.

Ключевые слова: металлургическое предприятие, атмосферный воздух, автоматический контроль выбросов, экологический мониторинг, распространение загрязняющих веществ, задержка передачи данных.

Funding: The study was conducted without external funding.

Финансирование: Исследование выполнено без внешнего финансирования.

Conflict of interest: the author declares no conflict of interest.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Introduction

A metallurgical plant is a complex production facility with multiple emission sources. Measuring instruments, automated data transmission systems, monitoring stations, and mathematical models are used to monitor the impact on the atmosphere. Automated systems measure pollutant concentrations and transmit the information to environmental services. Mathematical models help estimate the spread of pollutants, taking into account wind direction, emission characteristics, and other conditions. Modern digital solutions allow for the integration of information on production processes into a unified information environment.

The accuracy of the calculation depends not only on the quality of the measurements but also on the time it takes for the information to travel from the instrument to the calculation system. If the data arrives late, the model may describe atmospheric conditions that have already changed. This issue is especially significant for large enterprises, where emission sources are distributed over a large area and data is transmitted through various communication channels and software.

The main objective of the study is to assess the impact of delays and data losses on the accuracy of operational calculations of pollutant spread and to identify ways to improve the reliability of digital environmental monitoring.

The Magnitogorsk Iron and Steel Works (PJSC MMK) is considered as an example of a large metallurgical enterprise.

Materials and methods

According to data published in open sources on the enterprise's digital solutions as of May 25, 2026, MMK utilizes automated emissions monitoring, an environmental control center, air quality monitoring stations, mobile laboratories, video stream analysis, and a mathematical model of pollutant dispersion [5]. This allows environmental monitoring to be viewed as a single chain: from receiving measurements to making a decision by the dispatcher. However, open sources do not provide actual values for measurement delays and losses, which are necessary for assessing their real impact on MMK calculations. Therefore, this work is of a computational and analytical nature and does not constitute an assessment of confirmed malfunctions or the effectiveness of a specific MMK system.

As an example of the automated control architecture, the description of the system on the AC DKiM platform is used Xpert [4]. The developer's documentation specifies automatic sensor polling every 30 seconds and reporting of data every 30 minutes. These parameters are specific to the technical solution described and are not considered in this paper as validated parameters of MMC systems or universal requirements for industrial monitoring.

First, it's important to consider the stage at which information might be delayed. Delays occur not only during network transmission. The system may be waiting for the next change, accumulating data before sending it, performing pre-processing, verifying the accuracy of readings, or waiting for computing resources to become available. After that, time is required to calculate the actual pollutant dispersion. Therefore, the entire data path, from the moment of measurement to the final result, must be considered.

If most of the time is spent waiting for the next poll or processing on the server, network upgrades will have only a limited effect. Therefore, increasing the connection speed doesn't always eliminate the root cause of latency.

It's important to consider the scale of air mass movement during the data transmission delay. At wind speeds of two to five meters per second, an air mass travels a distance of six hundred to one and a half kilometers in five minutes. In thirty minutes, this distance ranges from three and a half to nine kilometers. These values demonstrate how significant the outdated nature of information can be for operational monitoring. However, the distance traveled by an air mass cannot automatically be considered a model error. The actual spread of pollutants depends on emission variability, weather conditions, turbulence, and other factors.

The obtained values should be perceived as a preliminary estimate of the scale of the problem, and not as a measured error.

When recording short-term surges, measurements are taken every 30 seconds. This means that approximately forty measurements will be taken in twenty minutes. If even four of these are lost, data completeness drops to 90 percent. If eight measurements are lost, the completeness drops to 80 percent. Such risks can be mitigated by using more frequent measurements during periods of potential surges and additional detection tools, including video analysis.

Data completeness does not directly determine the accuracy of the calculation. The impact of gaps is determined not only by their number but also by changes in emission parameters during periods without measurements. Gaps during periods of relatively stable emissions and gaps during periods of sharp increases in emission intensity can have different impacts on the final estimate.

Results and discussion

Based on the examples examined, several areas for system improvement are proposed. First and foremost, it is necessary to separate operational and reporting modes.

For reporting, completeness, integrity, and subsequent verification of information are essential. For operational management, the most crucial factor is the rapid receipt and relevance of data. Even technically correct information may be too outdated for assessing the current situation if these tasks are not separated.

It is proposed to divide information processing between measuring devices at emission sources, local nodes in production facilities, and a central environmental control room. At the first level, measurements are taken and time is recorded. At the second level, data is verified, sudden changes are identified, and the information is prepared for transmission. At the third level, information from various sources is combined and the spread of pollutants is calculated.

Local nodes allow some operations to be performed close to the data source, reducing the load on the central server. At the same time, the original measurements, their acquisition time, and processing results must be preserved until the next check.

Another area worth considering is the priority transmission of environmental data. If measurements, service information, and video streams share a common network, it's important to prevent critical messages from being held up by less urgent traffic. It's advisable to allocate a separate network segment for environmental monitoring or prioritize measurements and messages about sudden changes. If the primary channel fails, the system should, if possible, switch to a backup channel.

Measuring devices, local nodes, and the central system must use consistent time. For each message, the measurement time and the time it arrived at the central system must be stored. This will allow us to distinguish current data from delayed data and estimate the actual delay.

During periods of increased risk of short-term emissions, the polling frequency can be temporarily increased, if the instrument specifications allow it. Video analytics can help determine the time of the event, and comparing this information with gas analyzer readings can identify events that the system is not fully registering.

To reduce calculation time, pre-calculated coefficients for the impact of sources on individual points in the area can be used. If emissions change, the system updates the corresponding part of the calculation without repeating all calculations. The coefficients should be updated when weather conditions change. The feasibility of this approach depends on the mathematical model and requires verification.

The time from measurement to data receipt, the percentage of lost measurements, the duration of outages, the variability in message delivery times, the validation and processing time, and the calculation time should be recorded. Analyzing these metrics helps identify bottlenecks. For example, if the delay is caused by waiting for the next measurement, increasing the network speed will not solve the problem.

According to publicly available MMK materials, the plant already employs a unified control center, a pollutant distribution model, machine vision, a network of monitoring posts, and mobile laboratories [4]. However, actual delay values and the percentage of lost measurements are not provided in the available materials, so their actual contribution to calculation error cannot be determined.

To verify this, the spread of pollutants can be calculated using archival data: first with actual delays and gaps, then with reconstructed data, consistent with the measurement times. The obtained results should be compared with observations at atmospheric air monitoring stations.

This approach will help assess the impact of data delays and refine system performance requirements. However, further analysis will be required to separate data transmission errors from errors in the model itself.

Conclusion

The study shows that the quality of operational environmental monitoring depends not only on the accuracy of measuring instruments but also on the timeliness of data entry into the calculation system. Total processing time includes waiting for measurements, pre-processing, transmission, queues, verification, and calculation. Therefore, a high channel speed alone does not guarantee efficiency. Delays, missed measurements, and time inconsistencies must be assessed together. Each of these factors can limit the accuracy of calculations. System requirements should be established based on actual production data and comparison of calculations with observations.

Thus, the goal of digital environmental monitoring at a metallurgical plant is not simply to collect a large number of measurements, but to obtain timely, consistent, and verified information suitable for decision-making.

References

1. Bashmakov I.A. Greenhouse gas emissions from the global ferrous metallurgy: past, present and future // Ferrous metallurgy. – 2021. – Vol. 77, No. 8. – P. 882–901.
2. Budanov I.A., Ustinov V.S. Social problems of metallurgy // Scientific works of the Institute of Economic Forecasting of the Russian Academy of Sciences. – 2021. – P. 192–215.
3. Kazakova N.A., Kogdenko V.G. Analysis of factors influencing the level of environmental risks of ferrous metallurgy companies // Chernye Metally. – 2021. – No. 2. – P. 69–75.
4. Kazakova N.A., Kogdenko V.G. Methodology for studying environmental risks of the largest Russian ferrous metallurgy companies // Cherny Metally. – 2021. – No. 4. – P. 70–75.
5. Lapteva A.V., Lisienko V.G., Chesnokov Yu.N., Zagaynov S.A. Methodology for determining the integrated emission of carbon dioxide in ferrous metallurgy processes for their comparative assessment // Modern scientific achievements in metallurgical heat engineering and their implementation in industry. – 2015. – P. 58–62.
6. Lisienko V.G., Lapteva A.V., Chesnokov Yu.N., Lugovkin V.V. Comparative emission of greenhouse gas CO2 within the ferrous metallurgy // News of higher educational institutions. Ferrous metallurgy. – 2015. – Vol. 58, No. 9. – P. 625–629.
7. Official website of PJSC Magnitogorsk Iron and Steel Works. Sections on ecology and environmental monitoring [Электронный ресурс]. – URL: https:// mmk / ru. Accessed October 25. (accessed: 26.10.2026).
8. Magnitogorsk Iron and Steel Works (MMK) is creating an emission source control system // Official website of MMK. April 26. – 2026.
9. Hadeed S.J., O'Rourke M.K., Burgess J.L., Harris R.B., Canales R.A. Hadeed SJ, O'Rourke MK, Burgess JL, Harris RB, Canales RA Imputation methods for addressing missing data in short-term monitoring of air pollutants // Science of the Total Environment. – 2020. – Vol. 730. – Art. 139140.
10. Van Hua, Nguyen T., Dao M.-S. Nguyen HD, Nguyen B.T. The impact of data imputation on air quality prediction problem // PLOS ONE. – 2024. – Vol. 19, No. 9.

Received: 21.10.2026
Accepted: 02.11.2026
Published: 28.11.2026

УДК 004.738.5:35

DOI: 10.32743/UniTech.2026.152.11.23645

Opportunities for implementing internet of things technologies in digital public administration

Mukhtarov Mark Vahidovich
Master's student, Department of Information Technologies in Public Administration, Academy of Public Administration under the President of the Republic of Azerbaijan
Republic of Azerbaijan, Baku
E-mail: muxtarovmark464@gmail.com

Возможности применения технологий интернета вещей в цифровом государственном управлении

Мухтаров Марк Вахидович
магистрант кафедры информационных технологий в государственном управлении
Академия государственного управления при Президенте Азербайджанской Республики
Республика Азербайджан, г. Баку

Abstract

The article examines opportunities for implementing Internet of Things (IoT) technologies in digital public administration and the conditions required for their effective and secure adoption. The purpose of the study is to systematize the technological components of IoT, identify promising public-sector applications, and assess the principal organizational constraints. The methodology is based on analysis and synthesis of scholarly literature on IoT, cyber-physical systems, and digital governance, combined with a comparative review of practical application scenarios. The study shows that sensors, communication networks, cloud platforms, and automated control mechanisms can support real-time data collection and more responsive administrative decisions. Applications considered include intelligent transportation, utilities, environmental monitoring, maintenance of public infrastructure, and agriculture. Particular attention is paid to potential uses of these solutions in Azerbaijan, where digital government infrastructure may provide a basis for further integration. Key implementation challenges include cybersecurity threats, personal data protection, interoperability between public information systems, limited specialist skills, and the need for clear institutional responsibility. The article concludes that IoT deployment should proceed gradually

Библиографическое описание: Мухтаров М.В. Возможности применения технологий интернета вещей в цифровом государственном управлении // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23645

For citation: Mukhtarov M.V. Opportunities for implementing internet of things technologies in digital public administration // Universum: Technical Sciences : electronic scientific journal. 2026. No. 11(152). Available at: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23645

through pilot projects, measurable performance assessment, and integrated security measures. As a conceptual and analytical review, the study does not claim to establish the measured economic impact of specific deployments.

Аннотация

В статье рассматриваются возможности внедрения технологий Интернета вещей (IoT) в систему цифрового государственного управления, а также условия их эффективного и безопасного применения. Цель исследования заключается в систематизации технологических компонентов IoT, определении перспективных направлений использования и выявлении основных организационных ограничений. Методологическую основу составляют анализ и обобщение научных публикаций по Интернету вещей, киберфизическим системам и цифровому управлению, а также сравнительное рассмотрение практических сценариев применения. Показано, что датчики, коммуникационные сети, облачные платформы и механизмы автоматизированного управления позволяют собирать данные в реальном времени и повышать оперативность управленческих решений. Рассмотрены примеры использования IoT в интеллектуальных транспортных системах, коммунальном хозяйстве, экологическом мониторинге, обслуживании государственной инфраструктуры и сельском хозяйстве. Отдельное внимание уделено потенциальным направлениям применения данных решений в Азербайджане. Выявлены ключевые ограничения, включая угрозы кибербезопасности, защиту персональных данных, несовместимость информационных систем, недостаток квалифицированных кадров и необходимость согласованного институционального управления. Сделан вывод о целесообразности поэтапного внедрения IoT на основе пилотных проектов, оценки измеримых результатов и комплексных мер защиты. Исследование носит обзорно-аналитический характер и не предполагает экспериментальной оценки экономического эффекта конкретных внедрений.

Keywords: Internet of Things, IoT, digital public administration, e-government, smart city, cyber-physical systems, automation.

Ключевые слова: Интернет вещей, IoT, цифровое государственное управление, электронное правительство, умный город, киберфизические системы, автоматизация.

Introduction

Digital transformation is changing public administration through faster information exchange, integrated services and data-informed decision-making. The Internet of Things (IoT) connects physical assets to information systems through sensors, networks and processing platforms; foundational surveys identify both its architectural potential and integration difficulties [1, 2]. In the public sector, this development raises a governance question: how can continuous monitoring improve services without undermining accountability, security or equitable access? Smart-city research illustrates the promise of connected urban infrastructure, while security studies highlight risks associated with the collection and transmission of device data [8, 9].

IoT can support transport management, utilities, environmental protection and infrastructure maintenance. Azerbaijan’s national development priorities provide a policy context for examining such applications [5]. However, prospective uses should not be presented as evidence of already

achieved outcomes. The objective of this study is to identify technically feasible and institutionally responsible pathways for adopting IoT in digital public administration, with particular attention to Azerbaijan. Specifically, the article (i) synthesizes the main technological components and use cases, (ii) examines organizational, legal, economic and cybersecurity constraints, and (iii) proposes a staged approach to pilot selection and evaluation. The study is a conceptual review rather than an empirical impact assessment.

Materials and Methods

For future replication, a systematic extension should document searches in Scopus, Web of Science and Google Scholar using combinations of “Internet of Things”, “IoT”, “public administration”, “smart city”, “interoperability”, “cybersecurity” and “Azerbaijan”, with explicit date ranges and screening records. This proposed protocol is not represented as a search already performed.

This article applies a structured narrative review and qualitative comparative analysis rather than a systematic review or meta-analysis. The analytical corpus consists of the ten references listed below: foundational IoT architecture studies [1–4, 7, 8], security and governance guidance [6, 9, 10], and an Azerbaijan policy document [5]. Sources were retained when they directly addressed IoT architecture, public-service applications, security requirements or national policy relevance. General technology commentary without an identifiable scholarly or institutional source, duplicate accounts and material unrelated to these themes were excluded. The comparison used four analytical categories: technology, administrative application, implementation constraints and staged adoption. This is a transparent description of the sources used in the present manuscript; no database search log, exact search dates or comprehensive screening counts were recorded, so the review does not claim exhaustive or reproducible systematic coverage. No original interviews, surveys, experiments or quantitative impact estimates were conducted.

Cloud platforms and analytical tools organize large volumes of incoming data, while automated control mechanisms convert analysis into operational responses. For example, smart energy systems can adjust distribution to demand, and traffic signals can adapt to changing road conditions. Such arrangements support more timely decisions and reduce dependence on manual monitoring [2].

IoT also underpins cyber-physical systems, in which digital computation interacts with physical processes. These systems are especially relevant to infrastructure management, including transport, utilities and public facilities. Their effective operation depends on reliable sensors, communication channels and control algorithms. The integration of physical monitoring and digital management is therefore a central contribution of IoT to public-sector automation [3].

Results and Discussion

Smart-city management is a major application of IoT in the public sector. Sensor networks and integrated platforms can supply real-time information about transport, utilities and environmental conditions. In transportation, vehicle counts and traffic-flow measurements can inform adaptive signal control and route planning. These tools may reduce congestion and improve the responsiveness of municipal services [1]. In utility services, smart meters record electricity, gas

and water consumption automatically. The resulting data can support resource allocation, fault detection and consumption monitoring. Environmental sensors can track air quality, water conditions and temperature, helping public authorities identify risks and respond more quickly. Early-warning systems can also assist emergency services in detecting hazardous conditions, although their reliability depends on equipment quality and effective response procedures [2]. Research on smart-city IoT architectures further highlights the need to integrate heterogeneous devices and urban information services [8].

IoT can complement e-government by shifting some services from citizen-initiated requests toward proactive monitoring. For example, connected infrastructure may report technical faults before residents submit complaints. Public agencies can use these data to prioritize maintenance, oversee state property and improve service continuity. In agriculture, soil and irrigation sensors offer opportunities for more efficient water use and support the smart-village model [4]. The practical value of these applications depends on more than device installation. Agencies need interoperable platforms, clearly defined responsibilities and processes that translate sensor readings into accountable decisions. IoT should therefore be viewed as a tool for improving service delivery rather than as an independent substitute for public-sector governance.

IoT implementation opportunities in Azerbaijan

Azerbaijan’s ongoing digitalization of public services creates opportunities for wider use of IoT technologies. Electronic government platforms and information-system integration can provide an institutional basis for connecting sensor-generated data with administrative processes. The potential benefits include more timely infrastructure monitoring, improved resource use and better coordination between service providers. Smart-city and smart-village initiatives are particularly relevant. Connected devices could support traffic monitoring, automated utility metering, environmental observation and infrastructure maintenance. In rural areas, soil-moisture sensors and smart irrigation could assist agricultural management and the efficient use of water resources. Remote monitoring of public facilities could also help detect technical problems and reduce avoidable maintenance costs.

Healthcare offers another potential application through connected medical devices and remote patient monitoring, particularly where access to services is limited. However, these possibilities should not be confused with evidence of nationwide deployment. Their implementation would require reliable connectivity, secure data handling, common technical standards and qualified specialists. National digital-development priorities provide useful policy context, but the effectiveness of individual IoT projects must be assessed through measurable results [5]. For Azerbaijan, a gradual approach is appropriate: identify public services with clear operational needs, test pilot systems, assess costs and security, and expand successful solutions. Such an approach would help ensure that technology adoption responds to practical governance priorities.

Security and management challenges

Pilot project design and evaluation. A feasible pilot should begin with a defined service problem, a responsible public authority and a baseline against which changes can be assessed. For example, an urban water-network monitoring pilot could track fault-detection time, repair response

time, service interruptions and total operating cost. A transport pilot could assess sensor uptime, incident detection and response times. These are proposed evaluation indicators, not measured results. Procurement should account for installation, connectivity, maintenance, cybersecurity, training and eventual device replacement, rather than purchase price alone. A decision to scale should follow an independently documented assessment of performance, affordability and security.

IoT technologies may strengthen digital public administration by supporting timely monitoring, coordinated responses and better-informed decisions. The review identifies potential applications in transport, utilities, environmental management and public infrastructure, including prospective opportunities in Azerbaijan. Its central conclusion is conditional: technological feasibility alone does not establish public value. Agencies need a clear service objective, a documented baseline, interoperable systems, legally grounded data governance, cybersecurity controls and accountable institutional ownership. Pilot decisions should consider full life-cycle costs, measurable service outcomes, accessibility for digitally disadvantaged groups and the risk of vendor lock-in. Because this article does not present original field data, the proposed implementation pathway requires subsequent empirical testing before claims of effectiveness or economic savings can be made.

Equity and supplier dependence. IoT-supported services can widen disparities if rural communities have weaker connectivity or if residents without digital skills cannot access alternative service channels. Pilot evaluation should therefore consider geographic coverage, accessibility and non-digital routes for complaints and assistance. Dependence on a single equipment or cloud vendor can also create switching costs and weaken public control over data. Open interfaces, documented data formats, interoperability testing and contractual exit provisions can reduce these risks. These institutional conditions are as important as technical functionality for sustainable public-sector adoption.

Limitations of the analysis. The national discussion identifies potential applications and policy relevance, but does not establish the extent of actual IoT deployment in Azerbaijan. The evidence base is selective, and the absence of field observations, procurement data and measured outcomes prevents causal or cost-effectiveness conclusions. The suggested pilot criteria are a framework for future evaluation rather than verified results.

The deployment of IoT in public administration introduces cybersecurity and governance risks. Connected sensors and controllers expand the number of potential entry points for attackers. Devices with limited computing resources may lack advanced security functions, while outdated software and weak authentication can expose networks to unauthorized access. Risks are particularly serious in transport, energy and other critical infrastructure because digital interference may have physical consequences [3]. Data protection is equally important. Sensor systems may collect information about public facilities and, in some cases, identifiable individuals. Agencies must establish lawful purposes for collection, appropriate retention periods, access controls and rules for sharing information. Encryption, secure device configuration, regular updates and continuous monitoring should form part of a comprehensive risk-management framework [6]. Interoperability is another challenge: equipment and platforms used by different agencies may follow incompatible technical standards. Fragmented systems can undermine information exchange and increase maintenance costs. Successful implementation therefore requires coordinated procurement, technical standards, staff training and clear institutional responsibility. Security and

governance safeguards must be designed from the outset rather than added after deployment. Security and privacy requirements for connected devices should be considered throughout system design and operation [9]. NIST guidance also recommends defining baseline device cybersecurity capabilities during procurement and deployment [10].

Conclusion

IoT technologies offer significant opportunities to improve digital public administration through real-time monitoring, automated control and more informed decisions. Their applications in transport, utilities, environmental protection and public infrastructure can support service quality and resource efficiency. In Azerbaijan, digital-government infrastructure and smart-settlement initiatives provide promising contexts for further development. Nevertheless, these benefits are not automatic. Cybersecurity, personal data protection, interoperability, institutional coordination and workforce skills remain essential conditions for effective implementation. A phased approach based on pilot projects, measurable outcomes and integrated safeguards can help public agencies adopt IoT solutions responsibly.

References

1. Atzori L., Iera A., Morabito G. The Internet of Things: A Survey // Computer Networks. – 2010. – Vol. 54, No. 15. – P. 2787–2805.
2. Gubbi J., Buyya R., Marusic S., Palaniswami M. Internet of Things (IoT): A Vision, Architectural Elements, and Future Directions // Future Generation Computer Systems. – 2013. – Vol. 29, No. 7. – P. 1645–1660.
3. Lee J., Bagheri B., Kao H.A. A Cyber-Physical Systems Architecture for Industry 4.0-Based Manufacturing Systems // Manufacturing Letters. – 2015. – Vol. 3. – P. 18–23.
4. President of the Republic of Azerbaijan. Azerbaijan 2030: National Priorities for Socio-Economic Development. Order of 2 February 2021, Official website of the President of Azerbaijan [Электронный ресурс]. – No. 2469. – URL: https://president.az/az/articles/view/50474 (accessed: 28.10.2026).
5. Rose K., Eldridge S., Chapin L. The Internet of Things: An Overview: Understanding the Issues and Challenges of a More Connected World. – Geneva: Internet Society, 2015. – 80 P.
6. Al-Fuqaha A., Guizani M., Mohammadi M., Aledhari M., Ayyash M. Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2015. – Vol. 17, No. 4. – P. 2347–2376. – DOI: 10.1109/COMST.2015.2444095.
7. Zanella A., Bui N., Castellani A., Vangelista L., Zorzi M. Internet of Things for Smart Cities // IEEE Internet of Things Journal. – 2014. – Vol. 1, No. 1. – P. 22–32. – DOI: 10.1109/JIOT.2014.2306328.
8. Sicari S., Rizzardi A., Grieco L.A., Coen-Porisini A. Security, privacy and trust in Internet of Things: The road ahead // Computer Networks. – 2015. – Vol. 76. – P. 146–164. – DOI: 10.1016/j.comnet.2014.11.008.

9. Fagan M., Megas K.N., Scarfone K., Smith M. IoT Device Cybersecurity Capability Core Baseline (NISTIR 8259A). – Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology. – 2020. – DOI: 10.6028/NIST.IR.8259A.

INDUSTRY AND MANUFACTURING

CHEMICAL TECHNOLOGIES AND CHEMICAL INDUSTRY

Received: 28.10.2026
Accepted: 05.11.2026
Published: 28.11.2026

УДК 669.85/.86+661.63

DOI: 10.32743/UniTech.2026.152.11.23682

Review of modern technologies for rare earth element recovery from phosphorites, phosphogypsum, and other phosphate industry products

Abdullayev Lazizjon Luqmonjon ugli
PhD student
Fergana State Technical University, Fergana
Republic of Uzbekistan, Fergana
E-mail: abdullayevlazizjon8@gmail.com
Nomozov Shuhratjon Yuldashali ugli
DSc, Leading scientific researcher
Institute of General and Inorganic Chemistry of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan
Republic of Uzbekistan, Tashkent
E-mail: shuhratjon.nomozov@mail.ru
Alimov Umarbek Kadirbergenovich
Chief scientific researcher
DSc, prof., Institute of General and Inorganic Chemistry of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan
Republic of Uzbekistan, Tashkent
E-mail: umaralihonalimov@mail.ru
Ortikova Safiye Saidmambiyevna
Senior teacher, PhD, Associate Professor
Fergana State Technical University
Republic of Uzbekistan, Fergana

Библиографическое описание: Обзор современных технологий извлечения редкоземельных элементов из фосфоритов, фосфогипса и других продуктов фосфатной промышленности // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Абдуллаев Л.Л.У. [и др.]. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23682

For citation: Review of modern technologies for rare earth element recovery from phosphorites, phosphogypsum, and other phosphate industry products // Universum: Technical Sciences : electronic scientific journal. Abdullayev L.L.U. et al. 2026. No. 11(152). Available at: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23682

Обзор современных технологий извлечения редкоземельных элементов из фосфоритов, фосфогипса и других продуктов фосфатной промышленности

Абдуллаев Лазизжон Лукмонжон угли
базовый докторант (PhD)
Ферганский Государственный Технический Университет
Республика Узбекистан, г. Фергана
Номозов Шухратжон Юлдашали угли
вед. науч. сотр., д-р. техн. наук, ст. науч. сотр., Институт общей и неорганической химии АН РУз
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Алимов Умарбек Кадырбергенович
гл. науч. сотр., д-р. техн. наук, проф.
Институт общей и неорганической химии АН РУз
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Ортикова Сафие Саидмамбиевна
PhD, доц., ст. преп
Ферганский Государственный Технический Университет
Республика Узбекистан, г. Фергана

Abstract

Rare earth elements (REEs) are critical raw materials essential for green energy technologies, advanced electronics, and defense applications. Facing severe primary supply vulnerabilities and geopolitical constraints, non-conventional secondary resources—such as phosphate rock, phosphogypsum, and phosphate industry processing tailings—offer a strategic and sustainable alternative. This comprehensive review systematically analyzes recent scientific literature and modern technological approaches for REE extraction and recovery from various types of phosphate raw materials and their processing products. Rather than presenting isolated laboratory-scale observations as industrial solutions, this work critically evaluates hydrometallurgical leaching, acidic extraction, and liquid-liquid extraction methodologies based on standardized performance indicators. The study synthesizes process characteristics, optimal leaching environments, reagent efficiencies, and technological limitations across diverse feedstocks. Furthermore, current technical challenges, environmental footprints, and industrial scalability constraints are comparatively discussed. By establishing a structured synthesis of published data, this review provides a comparative benchmark to guide sustainable REE recovery from secondary phosphate resources and support circular economy practices.

Аннотация

Редкоземельные элементы (РЗЭ) являются критически важным сырьем, необходимым для технологий зеленой энергетики, передовой электроники и оборонной промышленности. Столкнувшись с серьезными риском поставок из первичных месторождений и геополитическими ограничениями, нетрадиционные вторичные ресурсы — такие как фосфориты, фосфогипс и хвосты переработки фосфатной промышленности — представляют собой стратегическую и устойчивую альтернативу. В данном комплексном обзоре систематически анализируются недавние научные публикации и современные технологические подходы к извлечению РЗЭ из различных видов фосфатного сырья и продуктов его переработки. Вместо представления отдельных лабораторных исследований в

качестве готовых промышленных решений, в работе критически оцениваются методы гидрометаллургического выщелачивания, кислотной экстракции и жидкостной экстракции на основе стандартизированных показателей эффективности. В исследовании обобщены характеристики процессов, оптимальные условия выщелачивания, эффективность реагентов и технологические ограничения для различных видов сырья. Кроме того, в сравнительном аспекте рассматриваются текущие технические проблемы, экологический след и ограничения по масштабированию. Формируя структурированный синтез опубликованных данных, данный обзор служат сравнительным ориентиром для устойчивого извлечения РЗЭ и развития циркулярной экономики.

Keywords: Rare earth elements (REEs), Phosphorite, Phosphogypsum, Acid leaching, Vacuum carbothermal reduction, Green extraction, Circular economy.

Ключевые слова: Редкоземельные элементы (РЗЭ), Фосфориты, Фосфогипс, Кислотное выщелачивание, Вакуумное карботермическое восстановление, Экологичная экстракция, Экономика замкнутого цикла.

Introduction

Rare earth elements (REEs) encompass a group of 17 chemically cohesive elements, including the 15 lanthanides—from lanthanum (^{57}La) to lutetium (^{71}Lu)—alongside scandium (^{21}Sc) and yttrium (^{39}Y), which exhibit comparable ionic radii and coordination behaviors . Geochemically, REEs are divided into light rare earth elements (LREEs: La–Eu) and heavy rare earth elements (HREEs: Gd–Lu, Y, Sc) . Owing to their unique electronic configurations, sharp optical transitions, exceptional magnetic strength, and catalytic properties, REEs serve as indispensable technology-critical materials for high-performance permanent magnets (Nd, Dy, Tb), LED phosphors (Eu, Y), petroleum refining catalysts (Ce, La), green energy infrastructure, and defense systems **[1]**.Although their average crustal abundance is relatively high, ranging from 130 to 240, economically viable REE deposits are geographically restricted. Historically, global supply chains have experienced severe vulnerabilities due to localized production networks, where major producers contribute between 70 % and 90 % of global REE output . Recent geopolitical constraints, export quotas, and strict environmental regulations have prompted nations worldwide to search for strategic supply diversification and sustainable raw material streams .

In response to these supply chain challenges, non-conventional primary ores and industrial secondary resources have attracted major attention. Among these, phosphate rock (phosphorite) deposits and their industrial processing by-products—such as wet-process phosphoric acid solutions, processing tailings, phosphogypsum, and commercial fertilizer streams—represent one of the most promising secondary reservoirs for REEs . Extracting REEs as a valuable co-product during wet-process phosphoric acid production presents a viable pathway to meet growing material demands while fostering a sustainable circular economy **[1, 2]**.

Materials and Methods

The material for this comprehensive review consisted of peer-reviewed scientific publications from recent years (2020–2026) focusing on technological approaches for recovering rare earth elements (REEs) from phosphorites, phosphogypsum, and other secondary processing products of the phosphate industry.

To provide a structured and critical evaluation rather than a descriptive summary, the collected literature was analyzed and synthesized based on the following specific technological criteria:

1. Type and characteristics of the raw material (e.g., low-grade phosphorites, phosphogypsum matrix, fertilizer production tailings);

2. REE recovery method (e.g., hydrometallurgical acidic leaching, gradient leaching, vacuum carbothermal reduction, solid-phase extraction);

3. Main technological conditions (e.g., acid concentration, liquid-to-solid ratio, temperature, reaction kinetics, phase transformation parameters);

4. Process efficiency indicators (e.g., REE leaching efficiency %, precipitation rates, target element recovery yields);

5. Specific features and technical limitations of the technology (e.g., selectivity over matrix gangue impurities, acid consumption, scaling mitigation, environmental footprint, and industrial scalability).

Results and Discussion

Long-term quantitative production models based on ultimate recoverable reserves (URR) predict that global primary rare earth element extraction will face severe supply constraints in the coming decades. Even under optimistic scenarios where global production peaks at 1.28 Mt around 2115, primary production flows will remain insufficient to meet the surging demand driven by clean energy technologies, electronics, and global decarbonization initiatives. Under lower-bound projection scenarios, production peaks much sooner and at significantly lower rates (approx. 0.4 Mt), amplifying global supply chain vulnerabilities. In this context, relying solely on primary hard-rock deposits introduces structural supply bottlenecks, making the integration of phosphate reserves (exceeding 10 billion tonnes globally) a strategic imperative.

The evaluated technological pathways for REE recovery from phosphate-based raw materials are systematically categorized and compared below based on their specific raw material matrices, processing conditions, and performance metrics.

1. Processing Technologies for Primary Phosphorite Ores

Primary phosphorite deposits consist of fluorapatite ($Ca_5(PO_4)_3F$) associated with carbonate gangue. Recovering REEs from this matrix requires overcoming severe matrix entrapment where REEs substitute for calcium.

Two-Step Gradient HCl Leaching: Guided by thermodynamic E-pH stability diagrams, this method separates impurity removal from target extraction. In the first stage, targeted removal achieves >93.3 % Mg removal with minimal P loss. In the second stage, hydrochloric acid leaching

achieves >98 % REE leaching efficiency. As detailed in Table 1, while this method eliminates phosphogypsum generation and provides high selectivity, it demands high acid consumption and corrosion-resistant infrastructure **[3-4]**.

Vacuum Carbothermal Reduction: To bypass conventional wet-acid limitations, high-vacuum (~0.1Pa) carbothermal reduction at 800–1,300ºC volatilizes 98.61 % of phosphorus as elemental P_2, retaining 97.68 % of REEs in the solid clinker. Subsequent leaching yields a zero-waste profile, though it requires significant thermal energy inputs **[5]**.

2. Valorization of Phosphogypsum (PG) and Secondary Tailings

Global wet-process phosphoric acid manufacturing generates massive quantities of phosphogypsum containing 70–85 % of the original REEs locked inside an insoluble sulfate matrix ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) .

Pretreatment Phase Transformation: Chemical and physical pretreatment protocols (microwave irradiation, ultrasonication, and phase change into $CaCO_3$ or CaF_2) break down the sulfated crystal lattice, unlocking immobilized REEs and substantially increasing extraction yields (>70–80 %) **[6]**.

Advanced Hydrodynamic Extraction (ARIC Columns): Replacing traditional mixer-settlers with Asymmetric Rotating Impeller Columns (ARIC) enhances column hydrodynamics—achieving a 39 % reduction in droplet size and a 34.5 % increase in dispersed phase holdup, leading to near-complete liquid-liquid extraction (LLE) separation efficiency **[7]**.

3. REE Extraction from Commercial Phosphate Fertilizers

Commercial rock phosphate fertilizers contain 300 to 1,200 mg/kg of REEs, representing an unexploited secondary stream.

TODGA Organosilica Resin-in-Pulp (RIP) Systems: Traditional neutralization steps co-precipitate competing impurities (Ca, Fe, Al). Utilizing N,N,N',N'-tetraoctyl diglycolamide (TODGA) functionalized organosilica sorbents enables >90 % REE recovery at extreme acidity (pH < 0). Integrating these media into resin-in-pulp (RIP) systems eliminates energy-intensive initial filtration steps, streamlining recovery directly from fertilizer lixiviants **[8]**.

Table 1. Comparative evaluation of advanced technological pathways for REE extraction from phosphorites and secondary streams

Technology Pathway	REE Yield / Recovery	Main Advantages	Technical / Environmental Bottlenecks	Key References
Two-Step Gradient HCl Leaching	>98% REE leaching; 93.3% Mg removal	Removes Mg scaling; no phosphogypsum; high selectivity	High acid consumption in stage 2; requires corrosion-resistant reactors	Fu et al. (2025) [3] Gao et al. (2026) [4];
Vacuum Carbothermal Reduction	97.68% REE retention; 98.61% P volatilization	Zero-waste; direct elemental P_2 collection; eliminates wet tailing ponds	High thermal energy requirement (1,300 ºC); high vacuum maintenance	Xie et al. (2024) [5]

Technology Pathway	REE Yield / Recovery	Main Advantages	Technical / Environmental Bottlenecks	Key References
Eco-Friendly ARIC Extraction Column	Up to 100% LLE separation; 34.5% higher holdup	Gentle mixing; small droplet size (39% reduction); low organic solvent footprint	Requires precise hydrodynamic tuning and organic acid feed control	Rezakhani et al. (2025) [7]
TODGA Organosilica RIP System	>90% REE recovery at pH < 0	Eliminates filtration steps; extracts at extreme acidity; high selectivity	Sorbent synthesis costs; mechanical attrition of resin in pulp agitation	Tummala et al. (2024) [8]
PG Pretreatment Phase Change	Substantial yield increase (>70--80%)	Unlocks immobilized REEs inside gypsum lattice; enables circular reuse	Multi-stage process complexity; energy inputs for microwave/ultrasound	Nkabinde et al. (2025) [6]

Conclusions

As global demand for rare earth elements (REEs) accelerates alongside the green energy transition, conventional primary mining pathways face geographical constraints and long-term production bottlenecks. Associated phosphate rock (phosphorite) deposits and their industrial processing by-products—including wet-process phosphoric acid solutions, phosphogypsum tailings, and commercial fertilizers—represent an abundant, strategic secondary resource for REE recovery.

Technological advancements in beneficiation and hydrometallurgy have significantly enhanced recovery efficiencies while reducing environmental impacts:

Flotation Pretreatment: Eco-friendly bio-collectors and selective depressants targeted at Mg^{2+} active sites effectively separate apatite from dolomitic and calcitic gangues, lowering downstream acid consumption.

Hydrometallurgical Optimization: Two-step gradient hydrochloric acid leaching pathways enable >93 % magnesium removal with minimal phosphorus loss, followed by efficient REE leaching (>98 %) governed by intra-particle diffusion kinetics.

Pyrochemical -Vacuum Innovations: Vacuum carbothermal reduction at 800--1,300 ºC allows zero-waste elemental phosphorus volatilization (P_2) and solid-phase REE enrichment, achieving >97 % REE recovery upon subsequent leaching.

Green Separation Systems: Transitioning from proton-driven dissolution to coordination-driven complexation using Ionic Liquids (ILs), Deep Eutectic Solvents (DESs), and organic acids (citric acid) drastically reduces secondary pollution **[9-10]**.

Advanced Contactors - Sorbents: Innovating continuous extraction equipment—such as Asymmetric Rotating Impeller Columns (ARIC) with U-shaped impellers—and functionalized solid-phase media (TODGA organosilica sorbents in Resin-in-Pulp systems) streamlines mass transfer and eliminates energy-intensive filtration steps.

Pretreatment Protocols: Chemical phase transformation and physical pretreatment (ultrasonication, microwave irradiation) break down the insoluble sulfated matrix of phosphogypsum, liberating trapped REE ions **[11]**.

Future research should focus on industrial-scale integration, multi-objective techno-economic assessments, and life cycle assessments (LCA) to fully commercialize zero-emissions, circular economy frameworks for phosphorite-based rare earth recovery.

References

1. B. Dutta, K. Chatterjee, P.K. Jha [et al.]. A comprehensive compendium on rare earths: science, technology, sustainability, global perspective and India's strategic approach // Coordination Chemistry Reviews. – 2025. – Vol. 525. – Art. 217280. – DOI: 10.1016/j.ccr.2025.217280.
2. Rezaei, M. A Cross-Disciplinary Review of Rare Earth Elements: Deposit Types, Mineralogy, Machine Learning, Environmental Impact, and Recycling / M. Rezaei, G. Sanchez-Lecuona, O. Abdolazimi // Minerals. – 2025. – Vol. 15, No. 7. – Art. 720. – DOI: 10.3390/min15070720.
3. C. Fu, X. Lv, S. Zhang [et al.]. A novel process for the low-temperature recovery of rare earth elements and by-products from associated rare earth phosphate ores // Separation and Purification Technology. – 2025. – Vol. 356. – Art. 135728. – DOI: 10.1016/j.seppur. 2025.135728.
4. L. Gao, R. Zhu, Z. Zhou [et al.]. A two-step acid leaching strategy for impurity reduction and efficient REEs recovery from phosphate ores: mechanism, optimization, and economic evaluation // Minerals Engineering. – 2026. – Vol. 245. – Art. 110229. – DOI: 10.1016/j.mineng. 2026.110229.
5. S. Xie, J. Yang, R. Huang [et al.]. A novel process for the separation and recovery of phosphorus and rare earth elements from associated rare earth phosphate ores // Separation and Purification Technology. – 2024. – Vol. 351. – Art. 126687. – DOI: 10.1016/j.seppur.2024.126687.
6. S.S. Nkabinde, M. Ledwaba, N.P. Shumbula [et al.]. Pretreatment strategies for enhancing rare earth elements leaching efficiency from phosphogypsum – a review with a focus on hydrometallurgical processes // Journal of Rare Earths. – 2025. – Vol. 43. – P. 1450–1468. – DOI: 10.1016/j.jre.2025.04.015.
7. N. Rezakhani, E. Kashi, R. Habibpour [et al.]. Eco-friendly recovery of rare earth elements from phosphogypsum: introduction of a novel asymmetric rotating impeller extraction column with U-shaped impellers // Separation and Purification Technology. – 2025. – Vol. 357. – Art. 135740. – DOI: 10.1016/j.seppur.2025.135740.
8. C.M. Tummala, M. Dardona, S. Praneeth [et al.]. Extraction and separation of rare-earth elements from rock phosphate fertilizer with a diglycolamide-associated organosilica sorbent // Separation and Purification Technology. – 2025. – Vol. 357. – Art. 130139. – DOI: 10.1016/ j.seppur.2024.130139.
9. Ortiz-Castillo, J.E. Rare earth elements in the 21st century: a critical review of novel chemical extraction pathways from conventional hydrometallurgical to emerging greener methodologies / J.E. Ortiz-Castillo, D. Dreisinger, W. Liu // Coordination Chemistry Reviews. – 2026. – Vol. 532. – Art. 217969. – DOI: 10.1016/j.ccr.2026.217969.
10. H.W. Khan, B.M. Negash. A review on occurrence, clean energy applications, sustainability, and eco-friendly separation techniques of rare earth elements // Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C. – 2026. – Vol. 144. – Art. 104407. – DOI: 10.1016/j.pce.2026.104407.

11. J. Wang, M. Guo, M. Liu [et al.]. Long-term outlook for global rare earth production // Resources Policy. – 2019. – Vol. 64. – Art. 101569. – DOI: 10.1016/j.resourpol.2019.101569.

Received: 04.11.2026
Accepted: 09.11.2026
Published: 28.11.2026

УДК 547.7+667.6

DOI: 10.32743/UniTech.2026.152.11.23693

Modification of phthalocyanine compounds and production of pigments based on them

Abjalilova Mashkhura
master's student
Gulistan State Pedagogical Institute
Uzbekistan, Gulistan
E-mail: mashxuraabjalilova@gmail.com
Jalilova Sitora
master's student
Gulistan State Pedagogical Institute
Uzbekistan, Gulistan
Tojiqulov Mukhtorbek
senior Lecturer
Department of Natural Sciences, PhD in Technical Sciences Gulistan State Pedagogical Institute
Uzbekistan, Gulistan
E-mail: tojiqulovmuxtorbek0@gmail.com
Fayziev Jakhongir
doctor of Technical Sciences
Tashkent Research Institute of Chemical Technology
Uzbekistan, Tashkent

Модификация фталоцианиновых соединений и получение пигментов на их основе

Абжалилова Машхура
магистрант
Гулистанский государственный педагогический институт
Республика Узбекистан, г. Гулистан
Жалилова Ситора
магистрант
Гулистанский государственный педагогический институт
Республика Узбекистан, г. Гулистан

Библиографическое описание: Модификация фталоцианиновых соединений и получение пигментов на их основе // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Абжалилова М. [и др.]. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23693

For citation: Modification of phthalocyanine compounds and production of pigments based on them // Universum: Technical Sciences : electronic scientific journal. Abjalilova M. et al. 2026. No. 11(152). Available at: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23693

Тожикулов Мухторбек
ст. преп. кафедры естественных наук
д-р филос. по техническим наукам, Гулистанский государственный педагогический институт
Республика Узбекистан, г. Гулистан
Файзиев Джахонгир
д-р техн. наук
Ташкентский научно-исследовательский институт химической технологии
Республика Узбекистан, г. Гулистан

Abstract

This study examined copper phthalocyanine and a sample synthesized in the presence of calcium chloride. The objective was to compare the spectral characteristics of the products and assess the changes associated with adding the calcium-containing component. Phthalic anhydride, urea, and copper sulfate were used for the synthesis in diethylene glycol. Calcium chloride was also added to the reaction mixture for the modified sample. The products were examined by infrared spectroscopy and UV–Vis absorption spectroscopy. UV–Vis spectra were recorded in dimethylformamide at a mass concentration of 0.00005 g/mL. The infrared spectra showed bands in the 1600–1500 and 1388–1330 cm^{-1} regions, corresponding to bond vibrations in the phthalocyanine macrocycle. The electronic absorption spectrum of copper phthalocyanine showed a maximum at 290.5 nm. Signals at 320.5, 594.5, and 654.0 nm were observed for the modified sample. The spectra differed in absorption band positions and intensities while retaining characteristic features of the phthalocyanine system. These findings characterize the spectral features of the products and provide a basis for further study of their composition, structure, and pigment properties. The results also provide a basis for evaluating the potential use of these materials in pigment formulations.

Аннотация

В работе исследовали фталоцианин меди и образец, синтезированный в присутствии хлорида кальция. Цель исследования заключалась в сравнении спектральных характеристик полученных продуктов и оценке изменений, сопровождающих введение кальцийсодержащего компонента. Синтез проводили с использованием фталевого ангидрида, мочевины и сульфата меди в среде диэтиленгликоля. При получении модифицированного образца в реакционную смесь дополнительно вводили хлорид кальция. Продукты исследовали методами инфракрасной спектроскопии и электронной спектроскопии поглощения в ультрафиолетовой и видимой областях. Для электронных спектров использовали растворы в диметилформамиде с массовой концентрацией 0,00005 г/мл. В инфракрасных спектрах наблюдались полосы в областях 1600–1500 и 1388–1330 $см^{-1}$, соответствующие колебаниям связей фталоцианинового макроцикла. В электронном спектре фталоцианина меди зарегистрирован максимум при 290,5 нм. Для модифицированного образца отмечены сигналы при 320,5, 594,5 и 654,0 нм. Сопоставление спектров выявило различия в положении и интенсивности полос поглощения при сохранении характерных признаков фталоцианиновой системы. Полученные данные характеризуют спектральные

особенности исследованных продуктов и создают основу для дальнейшего изучения их состава, структуры и пигментных свойств. Полученные результаты служат основой для дальнейшей оценки возможности применения этих материалов в пигментных композициях.

Keywords: copper phthalocyanine, phthalocyanine pigments, calcium chloride, modification, infrared spectroscopy, UV–Vis spectroscopy.

Ключевые слова: фталоцианин меди, фталоцианиновые пигменты, хлорид кальция, модификация, ИК-спектроскопия, УФ-видимая спектроскопия.

Introduction

Phthalocyanines are conjugated macrocyclic compounds whose chemical structure can be varied by changing the central metal or introducing substituents on the aromatic rings. Such modifications offer a means of adjusting properties relevant to a particular application, including optical absorption and interactions with solvents [4, p. 39]. Copper phthalocyanine (CuPc) is a prominent member of this family and is used as a blue pigment. Its suitability for a given formulation depends on the chemical identity of the colorant as well as on its physical form and the way its particles are dispersed.

The crystal form is one of the variables that distinguish CuPc pigment preparations. The α, β and ε polymorphs have been identified by Raman markers in gouache paint based on C.I. Pigment Blue 15, and heating or laser exposure can induce transformations between particular forms [1]. Preparation conditions can therefore matter even when the chemical composition of the pigment is unchanged. For example, Suzuki and co-workers reported direct synthesis of finely powdered α-CuPc in decalin and observed slow conversion from the α form to the β form in that medium [10, p. 1250].

Chemical modification offers a different means of altering pigment color. C.I. Pigment Green 7 is a chlorinated copper phthalocyanine pigment [7]. It illustrates how substitution on the aromatic framework can produce a green pigment from a phthalocyanine framework also used in blue pigments. A representative structure of C.I. Pigment Green 7 is shown in Figure 1.

For pigment use, the behavior of the particles in the formulation is also important. A pigment dispersion must remain sufficiently uniform during processing and application, particularly in inkjet formulations. The preparation of a fine dispersion and the subsequent treatment of the particle surface are therefore relevant steps in developing a printing ink [3, p. 172].

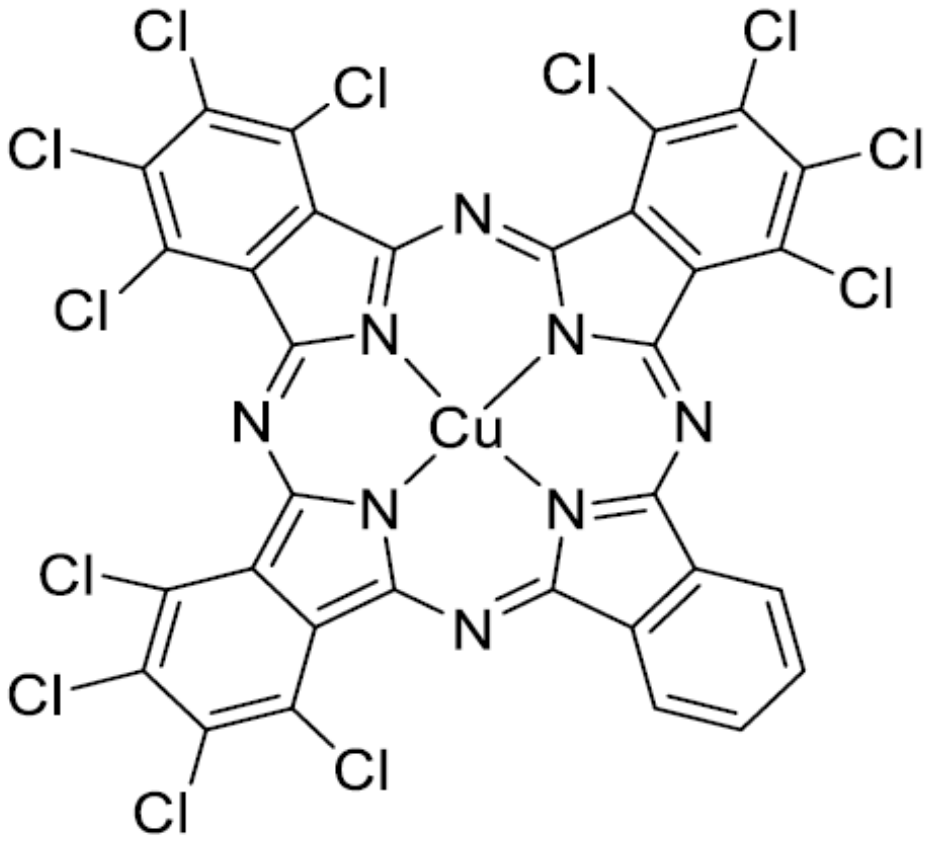


Figure 1. CI Pigment Green 7

In studies of inks for textile inkjet printing, organic pigment particles were dispersed by milling and ultrasonication and subsequently encapsulated in a UV-curable resin. The encapsulation improved dispersion stability under the conditions investigated [3, p. 172]. In a separate study, encapsulation of phthalocyanine pigments in a UV-curable hyperbranched polyester acrylate was investigated for printing on synthetic fabrics, with reported improvements in color durability [2]. Beyond pigment formulations, substituted copper and zinc phthalocyanines have also been studied as hole-transport materials in perovskite solar cells [5, p. 8243].

For calcium-containing pigment preparations, the literature describes both synthesis and characterization. Robiddinova and co-workers reported high-temperature synthesis and elemental analysis of a phthalocyanine pigment containing copper and calcium, with nitrogen and sulfur also considered in the study [9]. Kayumjonov and Yusupov investigated the thermal behavior of a copper- and calcium-containing phthalocyanine pigment and compared it with CuPc [6]. These studies provide a basis for examining related preparations from a spectroscopic perspective. Infrared spectroscopy probes vibrations of the macrocyclic framework, while UV–Vis spectroscopy records differences in the positions and intensities of absorption bands. Interpretation of spectra from pigment preparations also requires attention to possible contributions from aggregates or suspended particles [8, p. 957].

The aim of this study was to compare CuPc with a sample synthesized in the presence of calcium chloride using infrared and UV–Vis absorption spectroscopy. The comparison focused on the infrared bands associated with the phthalocyanine framework and on differences in the

electronic absorption profiles recorded in dimethylformamide. The observed spectral differences were used to characterize the two preparations and to identify features relevant to further investigation of their composition and pigment properties.

Materials and methods

Production of copper phthalocyanine. For the effective course of the reaction process, the influence of the amount of starting materials, temperature, and the catalyst on the yield of the phthalocyanine compound is of great importance. The following graphs analyze the factors influencing the yield of phthalocyanine synthesis. In particular, it was determined how factors influencing the reaction—the concentration of starting materials, temperature, reaction duration, and the presence of a catalyst—influence on the yield of the phthalocyanine compound**.**

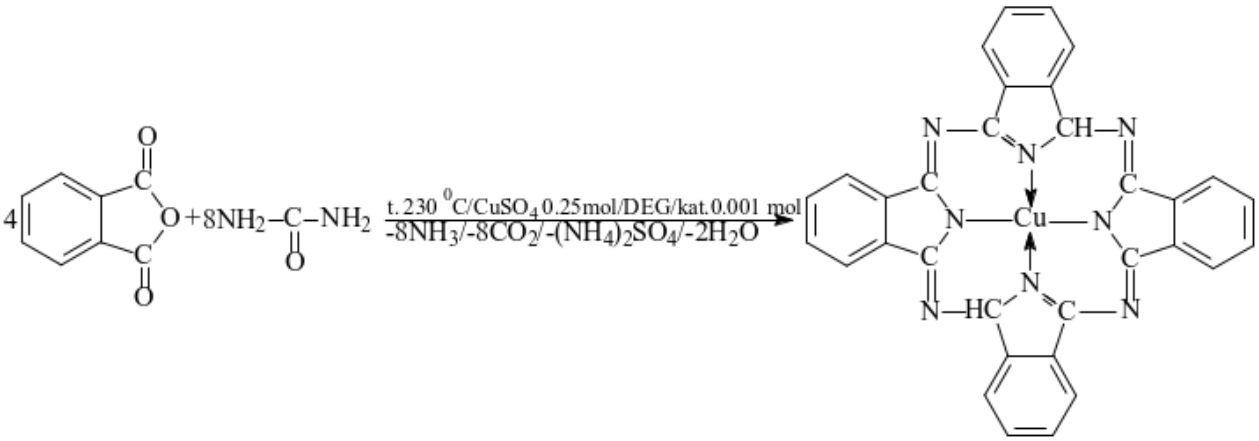


Figure 2. Copper phthalocyanine complex formation obtained in the solvent

Synthesis of copper-calcium phthalocyanine: in this synthesis process, phthalic anhydride, urea, copper sulfate ($CuSO_4$), calcium chloride ($CaCl_2$), and the TCTITI catalyst are used to form copper-calcium phthalocyanine ($Ca[CuPc]_2$). Diethylene glycol (DEG) is used as a solvent, ensuring that the reaction process proceeds more efficiently and evenly**.**

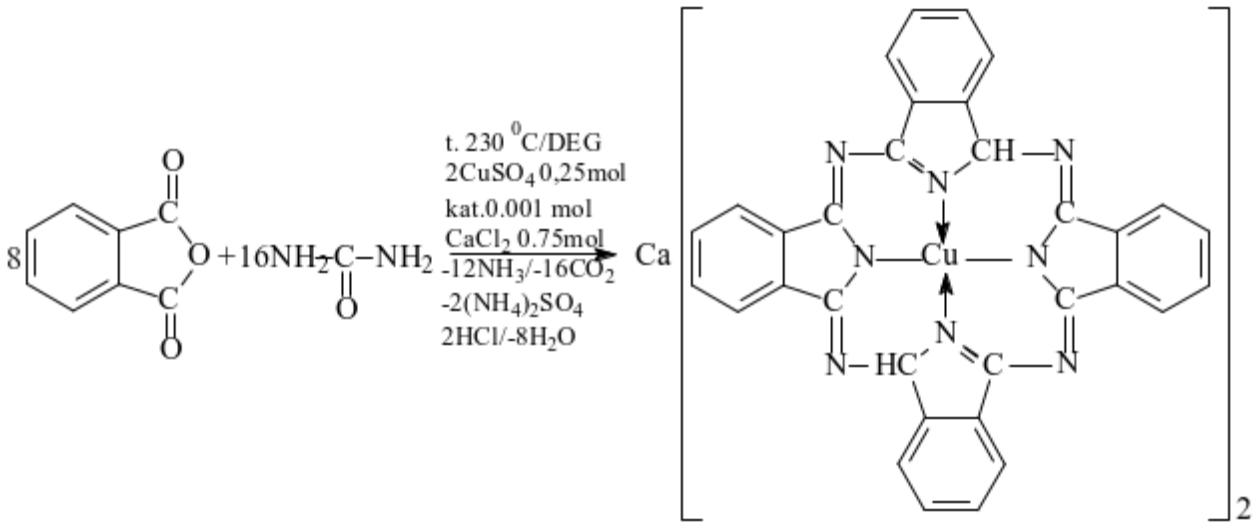


Figure 3. Preparation of the copper-calcium phthalocyanine complex in a solvent

Results and discussion

The infrared spectrum of the synthesized copper phthalocyanine is shown in Figure 4.

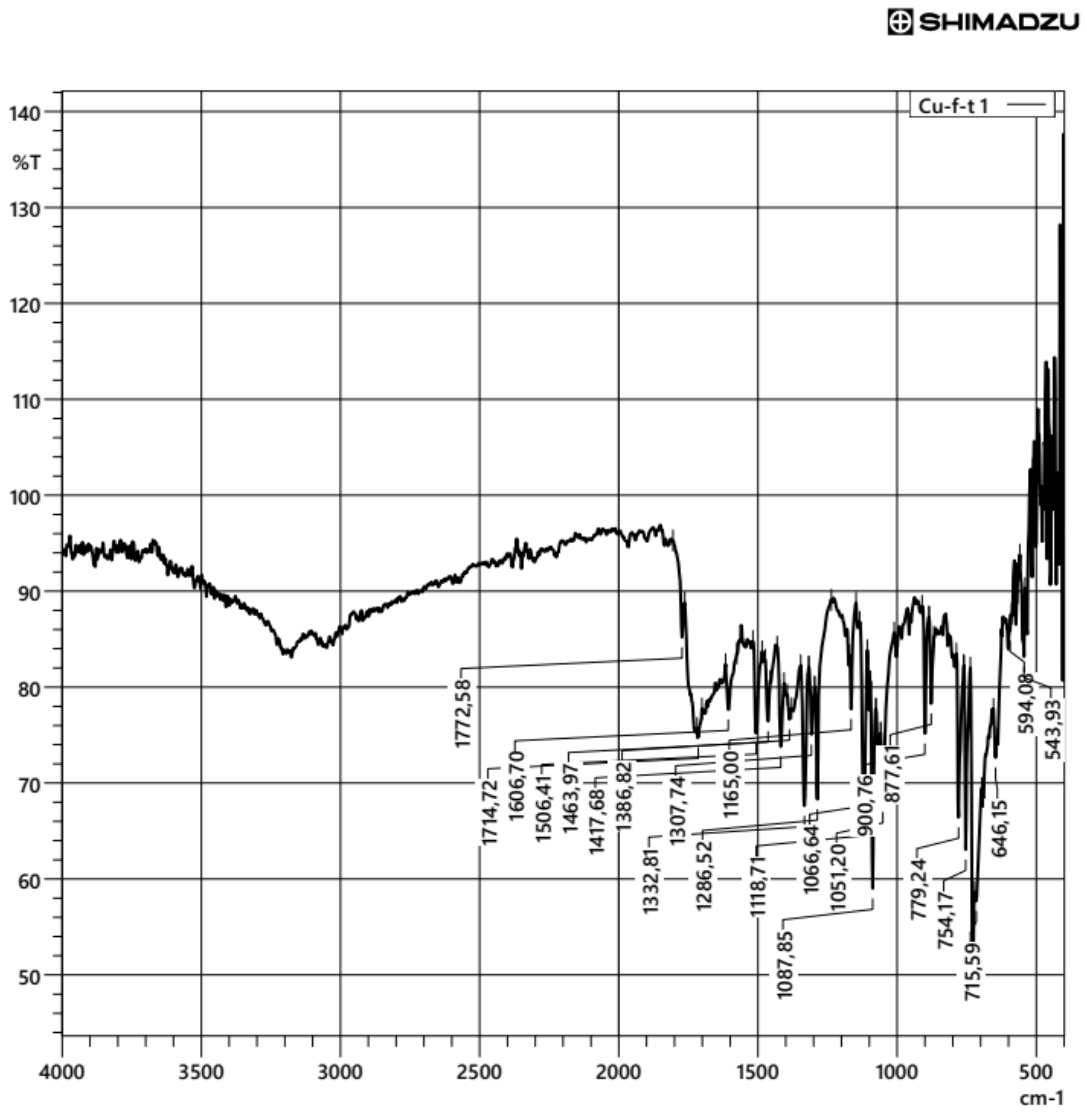


Figure 4. IR spectrum of copper phthalocyanine obtained in solvent

The CuPc infrared spectrum exhibits bands in the 1600–1500 cm^{-1} region associated with aromatic C=N and C=C vibrations, and in the 1480–1350 cm^{-1} region associated with C–N vibrations. Bands in the 1330–1100 cm^{-1} and 900–750 cm^{-1} regions are consistent with vibrations of the phthalocyanine framework and out-of-plane aromatic C–H modes, respectively. Absorption is also observed in the 700–500 cm^{-1} region. For comparison, substituted copper and zinc phthalocyanines have been reported to exhibit bands near 1607, 1506 and 1339 cm^{-1} [5].

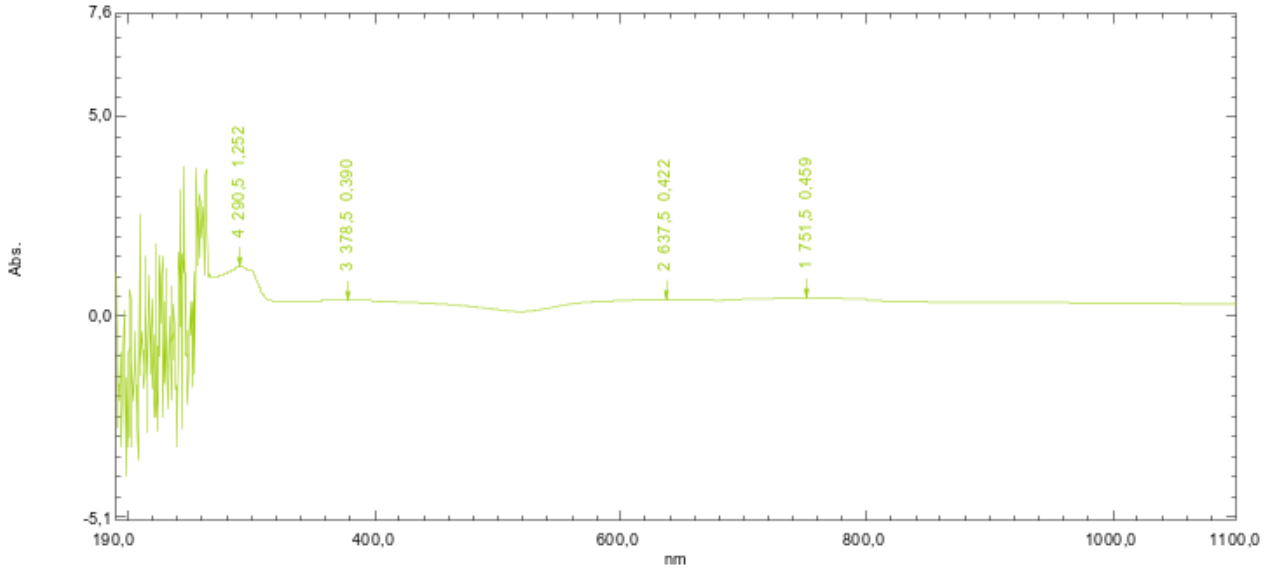


Figure 5. UV spectrum of copper phthalocyanine (CuPc) compound in DMFA solution obtained in solvent

UV-Vis spectral analysis of a solution of copper phthalocyanine (CuPc) compound in a polar aproton solvent—dimethylformamide (DMFA) —at a concentration of 0.00005 g/ml provided crucial data for determining its electronic structure, photophysical properties, and the probability of aggregation. As a result of the analysis, several characteristic absorption bands were recorded at different wavelengths. The high-intensity peak located at 290.5 nm (Abs = 1.222) is associated with $\pi \rightarrow \pi^*$ electron transitions in aromatic tetrapirrole rings, indicating the preservation of a highly conjugated π-electron system of the phthalocyanine nucleus. Assessing pigment solubility by UV–Vis spectroscopy requires distinguishing absorption by dissolved molecules from contributions by suspended particles or aggregates [8, p. 957].

The IR spectrum of copper-calcium phthalocyanine was studied and analyzed. Analysis of the IR spectrum confirmed the phthalocyanine structure and the presence of metal-nitrogen bonds within the substance.

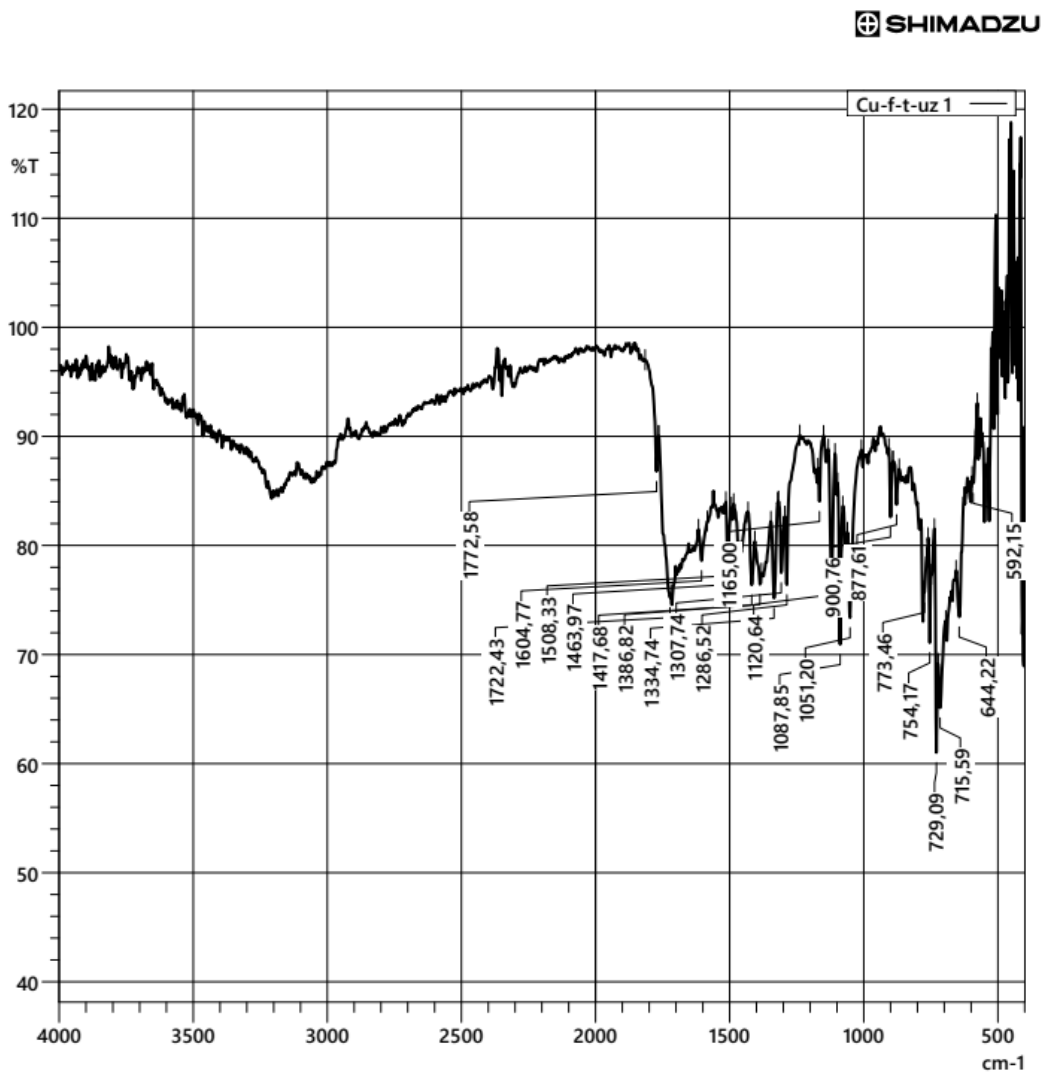


Figure 6. IR spectrum of copper-calcium phthalocyanine obtained in the solvent

The following important absorption regions were recorded in the spectrum: 1600–1500 cm^{-1} C=N and C=C vibrations in the aromatic ring, characteristic of phthalocyanine, 1388–1330 cm^{-1} – C–N bond vibrations, internal bonds of the phthalocyanine skeleton, 1087–1030 cm^{-1} C–H in-plane vibrations The atoms vibrate in a single plane, 900–750 cm^{-1} C–H out-of-plane vibrations, one of the C–H atoms characteristic of the aromatic structure emerges from the plane and oscillates up and down, 600–500 cm^{-1} – Cu–N and Ca–N bond vibrations, indicating the presence of a metal-nitrogen bond.

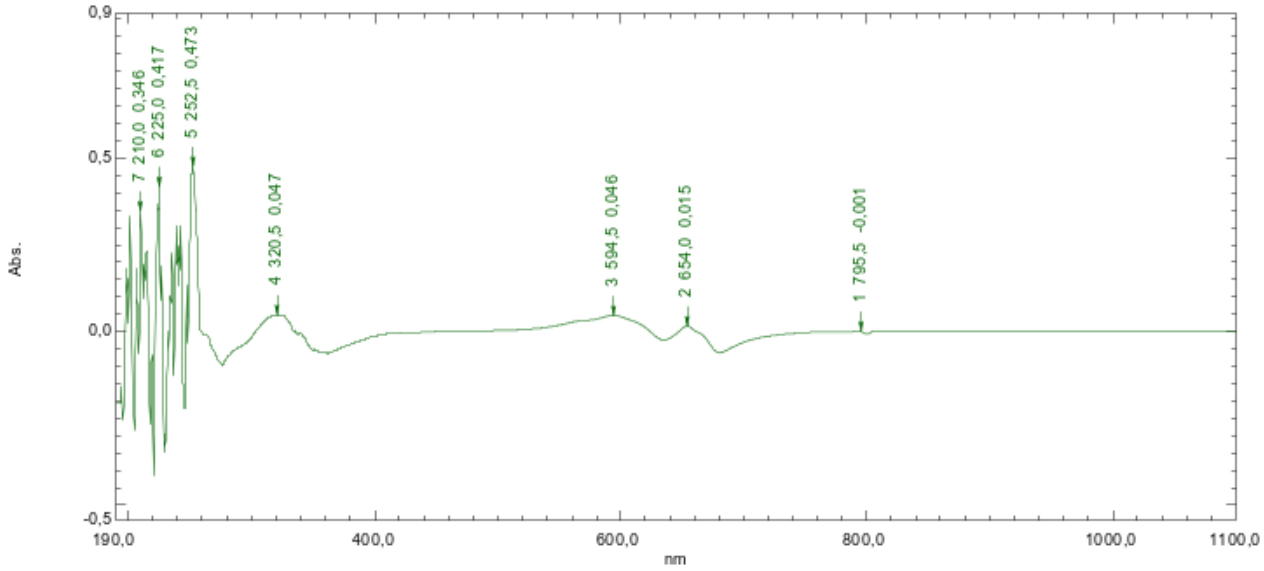


Figure 7. UV spectrum of the copper-calcium phthalocyanine (Ca[CuPc]$_2$) compound obtained in the solvent

The results of the UV spectral analysis of a 0.00005 g/ml solution of the copper-calcium phthalocyanine (Ca[CuPc]$_2$) compound in a dimethylformamide (DMF) medium show that the electronic structure and light absorption capacity of this metal-complex compound are characterized by an intensive $\pi \rightarrow \pi^*$ electron transition at a wavelength of 320.5 nm, indicating the integrity of the aromatic system and a fully delocalized π-system of the Ca[CuPc]$_2$ compound. The Q-section peaks at wavelengths of 594.5 nm and 654.0 nm correspond to $\pi \rightarrow \pi^*$ electronic transitions caused by the interaction between the central metal ions (Cu and Ca) and the chromophore system. These peaks confirm the metal-complex properties of this compound and the spectral changes under the influence of calcium.

Conclusion

As a result of the conducted research, complex compounds of copper phthalocyanine (CuPc) and copper-calcium phthalocyanine (Ca[CuPc]$_2$) were synthesized, and their molecular structure and electron-optical properties were characterized using spectroscopic methods. In the IR spectra, absorption lines characteristic of C=N and C=C oscillations were observed in the 1600–1500 cm^{-1} region, C–N bonds in the 1388–1330 cm^{-1} region, and absorption corresponding to metal–nitrogen coordination bonds in the 600–500 cm−1 region. UV-Vis spectroscopic analysis revealed characteristic absorption maxima at wavelengths of 290.5 nm for CuPc and 320.5 nm, 594.5 nm, and 654.0 nm for Ca[CuPc]$_2$. These spectral results indicate the preservation of the conjugated electron system of the phthalocyanine macro ring, as well as changes in electron transitions and optical absorption properties in the presence of metal components. The results obtained show the spectral characteristics of the copper-calcium phthalocyanine complex.

References

1. Balakhnina I.A., Chikishev A.Yu., Brandt N.N. Raman spectroscopy of thermo- and laser-induced transformations of gouache paint layer of copper phthalocyanine blue // Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. – 2024. – Vol. 318. – Art. 124430. – DOI: 10.1016/j.saa.2024.124430.
2. Hakeim O.A., Abdelghaffar F., Haroun A.A. UV-curable hyperbranched polyester acrylate encapsulation of phthalocyanine pigments for high performance synthetic fabrics printing // Dyes and Pigments. – 2020. – Vol. 177. – Art. 108307. – DOI: 10.1016/j.dyepig.2020.108307.
3. Hakeim O.A., Arafa A.A., Zahran M.K., Abdou L.A.W. UV-curable encapsulation of surface–Modified organic pigments for inkjet printing of textiles // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2014. – Vol. 447. – P. 172–182. – DOI: 10.1016/j.colsurfa.2014.01.075.
4. Hamad O.A., Kareem R.O., Omer P.K. Recent Developments in Synthesize, Properties, Characterization, and Application of Phthalocyanine and Metal Phthalocyanine // Journal of Chemical Reviews. – 2024. – Vol. 6, No. 1. – P. 39–75. – DOI: 10.48309/jcr.2024.412899.1250.
5. Hernández A., Hemasiri N.H., Kazim S., Ortiz J., Ahmad S. Sastre-Santos Á. Fluorinated- and non-fluorinated-diarylamine-Zn(II) and Cu(II) phthalocyanines as symmetrical vs. asymmetrical hole selective materials // Journal of Materials Chemistry C. – 2023. – Vol. 11, No. 24. – P. 8243–8253. – DOI: 10.1039/D3TC00254C.
6. Kayumjonov O., Yusupov M. Thermal Analysis Study of Copper and Calcium-Containing Phthalocyanine Pigment // Universum: khimiya i biologiya. – 2025. – No. 8 (134) [Электронный ресурс]. – URL: https://7universum.com/ru/nature/archive/item/20587 (accessed: 07.11.2026).
7. National Center for Biotechnology Information. PubChem Compound Summary for CID 169274, Pigment Green 7 [Электронный ресурс]. – URL: https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/169274 (accessed: 07.11.2026).
8. Patalag L.J. Quantifying Ultra-Low Pigment Solubilities by UV–Vis Spectroscopy: Implications for Toxicological Assessment // ACS Measurement Science Au. – 2026. – Vol. 6, No. 4. – P. 957–971. – DOI: 10.1021/acsmeasuresciau.5c00214.
9. Robiddinova M., Yusupov M., Sherkuziyev D. Synthesis and Comparative Analysis of Nitrogen, Sulfur, Calcium and Copper-Containing Phthalocyane Pigments // Universum: khimiya i biologiya. – 2023. – No. 12 (114) [Электронный ресурс]. – URL: https://7universum.com/en/nature/archive/item/16389 (accessed: 07.11.2026).
10. Suzuki S., Bansho Y., Nunokawa T. Syntheses of Finely Powdered Copper Phthalocyanine in Decalin // Nippon Kagaku Kaishi. – 1977. – No. 8. – P. 1250–1252. – DOI: 10.1246/nikkashi.1977.1250.

Received: 31.10.2026
Accepted: 19.11.2026
Published: 28.11.2026

УДК 666.973.6

DOI: 10.32743/UniTech.2026.152.11.23765

Comparative assessment of the chemical composition, XRF characteristics, and particle-size distribution of local sand raw materials for autoclaved aerated concrete production

Akramaliyeva Marhaboxon Maxmudjon qizi
Master's student, Namangan State Technical University
Uzbekistan, Namangan

Abduxakimov Tal'atjon Toxirjon o'g'li
PhD in Technical Sciences
Chief Laboratory Assistant
Megaton LLC
Uzbekistan, Tashkent
ORCID: 0000-0001-6249-952X
E-mail: talatbek1995@mail.ru

Сравнительная оценка химического состава, рентгенофлуоресцентных характеристик и гранулометрического состава местного песчаного сырья для производства автоклавного газобетона

Акрамалиева Мархабохон Махмуджон кизи
магистрант
Наманганский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Наманган

Абдухакимов Талъатжон Тохиржон угли
д-р филос. по техн. наукам (PhD)
главный лаборант, ООО «Мегатон»
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Abstract

This study presents a comparative characterization of local sand raw materials considered for use as the siliceous component in autoclaved aerated concrete (AAC) production. Four materials were examined: Samarkand white sand, Samarkand yellow sand, Qibray fine sand, and Qibray

Библиографическое описание: Акрамалиева М.М. кизи, Абдухакимов Т.Т.У. Сравнительная оценка химического состава, рентгенофлуоресцентных характеристик и гранулометрического состава местного песчаного сырья для производства автоклавного газобетона // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23765

For citation: Akramaliyeva M.M.Q., Abduxakimov T.T.O. Comparative assessment of the chemical composition, XRF characteristics, and particle-size distribution of local sand raw materials for autoclaved aerated concrete production // Universum: Technical Sciences : electronic scientific journal. 2026. No. 11(152). Available at: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23765

screened sand. The contents of major oxides, including SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, TiO_2, CaO, MgO, SO_3, K_2O, and Na_2O, were determined by energy-dispersive X-ray fluorescence (EDXRF) on fused glass beads, loss on ignition (LOI) according to GOST 8269.1 – 97, and the initial particle-size distribution by sieve analysis according to GOST 8735 – 88. A composite sample of the Samarkand deposit was additionally characterized by wavelength-dispersive X-ray fluorescence (WDXRF) using a Rigaku ZSX Primus III NEXT spectrometer. The SiO_2 contents of Samarkand white sand, Samarkand yellow sand, Qibray fine sand, and Qibray screened sand were 96.42, 94.53, 83.33, and 86.86 wt.%, respectively. WDXRF analysis of the deposit sample detected 53.0 wt.% O and 43.4 wt.% Si; the stoichiometric SiO_2 equivalent was 92.85 %, or 96.0 % after normalization to the oxide sum, in agreement with the results for the Samarkand sands. The fineness moduli of the four samples were 1.25, 1.60, 0.43, and 1.47, respectively. The results demonstrate that sand selection for AAC should not rely on SiO_2 content alone, but should integrate chemical composition, accompanying oxides, and initial particle-size distribution. The present work provides a raw-material-level comparison; further XRD, slurry-rheology, and controlled AAC production tests are required to establish the final technological performance of each sand source.

Аннотация

В работе представлена сравнительная характеристика местного песчаного сырья, рассматриваемого в качестве кремнезёмистого компонента при производстве автоклавного газобетона. Исследованы четыре материала: самаркандский белый песок, самаркандский жёлтый песок, мелкий песок Кибрая и отсеянный песок Кибрая. Содержание основных оксидов SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, TiO_2, CaO, MgO, SO_3, K_2O и Na_2O определено методом энергодисперсионного рентгенофлуоресцентного анализа (EDXRF) на сплавленных стеклообразных дисках, потери при прокаливании (ППП) – по ГОСТ 8269.1 – 97, исходный гранулометрический состав – ситовым анализом по ГОСТ 8735 – 88. Усреднённая проба Самаркандского месторождения дополнительно охарактеризована методом волнодисперсионного рентгенофлуоресцентного анализа (WDXRF) на спектрометре Rigaku ZSX Primus III NEXT. Содержание SiO_2 в самаркандском белом, самаркандском жёлтом, мелком и отсеянном песках Кибрая составило 96,42; 94,53; 83,33 и 86,86 мас.% соответственно. По данным WDXRF в пробе месторождения преобладают O (53,0 мас.%) и Si (43,4 мас.%); стехиометрический эквивалент SiO_2 составил 92,85 %, а после нормирования на сумму оксидов – 96,0 %, что согласуется с результатами для самаркандских песков. Модули крупности четырёх проб равны 1,25; 1,60; 0,43 и 1,47 соответственно. Результаты показывают, что выбор песка для автоклавного газобетона не должен основываться только на содержании SiO_2, а должен учитывать химический состав, сопутствующие оксиды и исходный гранулометрический состав. Работа выполнена на уровне сравнения сырья; для оценки итоговой технологической пригодности каждого источника песка необходимы рентгенофазовый анализ (XRD), исследование реологии шлама и контролируемые испытания при производстве газобетона.

Keywords: autoclaved aerated concrete, siliceous raw material, local sand, XRF analysis, SiO_2, particle-size distribution, raw-material characterization.

Ключевые слова: автоклавный газобетон, кремнезёмистое сырьё, местный песок, рентгенофлуоресцентный анализ, SiO_2, гранулометрический состав, характеристика сырья.

Introduction

The development of the construction-materials industry, efficient use of domestic mineral resources, and expansion of energy-efficient construction materials are among the priority directions of industrial policy in the Republic of Uzbekistan. Presidential Decree No. PF-21 of 16 February 2026 sets objectives for increasing the output of construction materials and expanding the use of new energy-efficient products [10]. Presidential Resolution No. PQ-436 of 2 December 2022 identifies improved resource and energy efficiency as an important component of the transition to a green economy [2,11]. These priorities make it necessary to assess not only the availability of local mineral resources but also their compositional stability and technological suitability for modern construction-material production.

Autoclaved aerated concrete (AAC) is a wall material that combines high porosity, low bulk density, and favorable thermal-insulation performance. Its properties depend on the interaction among raw-material composition, gas formation, and hydrothermal curing conditions. In the cement-lime-sand system, sand is the principal siliceous source and participates in reactions within the $CaO\text{-}SiO_2\text{-}H_2O$ system during autoclaving. Chen et al. demonstrated that the silica-lime-cement proportions and autoclaving parameters jointly affect AAC density, strength, and phase composition [4]. The review by Qu and Zhao likewise emphasized that AAC behavior should be interpreted through the coupled effects of raw-material type, pore structure, microstructure, and hydrothermal products [12].

The chemical composition of sand, particularly its SiO_2 content, is a primary descriptor of a siliceous raw material. However, a high SiO_2 concentration alone does not guarantee the quality of the final AAC product. The contents of Al_2O_3, Fe_2O_3, CaO, MgO, and alkali oxides provide additional information on associated mineral components and their potential behavior under hydrothermal conditions. In the 2024 study by Mészárosová et al., the reference quartz sand used in AAC technology contained 92.91 % SiO_2, and the authors emphasized the importance of considering chemical and mineralogical characteristics together when evaluating siliceous components [8]. This approach supports the comparison of quarry sands by their actual oxide composition rather than by the generic designation “quartz sand” alone.

Quartz particle size is another factor that directly influences hydrothermal synthesis in AAC. Isu, Ishida, and Mitsuda reported that finer quartz reacts more rapidly during the early stages of autoclaving and modifies the kinetics of tobermorite formation [6]. Their subsequent study linked quartz particle size to tobermorite development and mechanical properties [7]. Mitsuda et al. described the phase evolution during autoclaving, in which initially Ca-rich C-S-H products react with dissolved silica from quartz and subsequently develop toward 1.1-nm tobermorite [9]. Experiments by Galvánková et al. in model $CaO\text{-}SiO_2\text{-}H_2O$ systems further confirmed the influence of silica-source reactivity, particle size, and Ca/Si ratio on tobermorite synthesis [5].

The initial grading of sand also affects grinding requirements and the properties of the resulting sand slurry. Černý et al. showed that the specific surface area, particle-size distribution, and slurry consistency of siliceous raw materials are linked to the rheological state of fresh AAC

mixtures [1]. More recent studies have related the chemical composition and grading of alternative siliceous materials to the pore structure and engineering performance of autoclaved products. Ye et al. evaluated low-carbon AAC prepared from several solid-waste-derived siliceous materials and demonstrated relationships between raw-material characteristics, microstructure, and engineering properties [14]. In 2026, Shi et al. investigated Yellow River sediment as a siliceous component and linked its chemical-mineralogical composition and particle size to slurry behavior and the properties of the autoclaved material [13].

The literature therefore indicates three interrelated levels in the assessment of siliceous raw materials for AAC: (i) chemical composition and SiO_2 content; (ii) particle size and granulometric distribution; and (iii) the behavior of the ground material in slurry form and its hydrothermal reactivity. Nevertheless, practical comparative data on local quarry sands characterized within a single framework combining oxide composition, supplementary XRF elemental data, and sieve analysis remain limited. Accordingly, the objective of this study was to compare sand samples from the Samarkand and Qibray regions in terms of chemical composition and particle-size distribution, to obtain an additional WDXRF characterization of a composite sample of the Samarkand deposit, and to interpret the results from the standpoint of selecting siliceous raw materials for AAC production. The novelty of the study lies in the integrated comparison of local sands using chemical composition, XRF elemental information, and granulometric parameters within a common evaluation framework.

Materials and methods

Raw materials

Four sand samples were selected for the comparative study: Samarkand white sand, Samarkand yellow sand, Qibray fine sand, and Qibray screened sand. The materials were evaluated using the same set of raw-material indicators in order to assess their potential use as siliceous components in AAC production.

Chemical and XRF characterization

The chemical characterization included loss on ignition (LOI) and the contents of SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, TiO_2, CaO, MgO, SO_3, K_2O, Na_2O, MnO, Cr_2O_3, and Cl (Table 1). The oxide contents of all four sands were determined by energy-dispersive X-ray fluorescence (EDXRF) spectrometry using an Elite 600 Plus analyzer (Jingpu, China); to eliminate grain-size and mineralogical effects, each sample was fused into a homogeneous glass bead before measurement. LOI was determined gravimetrically according to GOST 8269.1 – 97. SiO_2 was treated as the principal indicator of siliceous content, whereas Al_2O_3, K_2O, and Na_2O were considered as indirect indicators of associated aluminosilicate components. Because XRF determines elemental composition rather than mineral phases directly, mineralogical interpretations were restricted to cautious qualitative inferences.

In addition, a composite (averaged) sample of the Samarkand sand deposit, from which both the white and the yellow sands are extracted, was analyzed by wavelength-dispersive X-ray fluorescence (WDXRF) spectrometry using a Rigaku ZSX Primus III NEXT spectrometer (Rigaku Corporation, Japan) with the standardless SQX calculation software. This sample was introduced as

an independent deposit-level control rather than as a fifth material: it was not included in the comparative evaluation of the four sands, which is based exclusively on the data in Tables 1 and 3. Its purpose was to verify the siliceous character of the Samarkand source by a second XRF technique and to obtain a full elemental spectrum, including light and trace elements that are not covered by the routine oxide analysis. Because the sample represents the deposit as a whole, its results are not assigned to either the white or the yellow sand; their consistency with Table 1 is examined in the Results section. The instrument report expressed the elemental composition as mass fraction (wt.%). Stoichiometric oxide equivalents were calculated from the elemental results for comparative purposes only; these calculated values were not interpreted as directly measured oxide contents or as mineral-phase fractions.

Particle-size analysis

The initial particle-size distribution was determined by sieve analysis according to GOST 8735 – 88 using the standard set of sieves with openings of 10, 5, 2.5, 1.25, 0.63, 0.315, and 0.160 mm and the pan; the retained fractions were expressed as percentages of the sample mass. For Qibray screened sand, the retained masses were originally recorded in grams and were recalculated as percentages relative to a total sample mass of 1002.3 g. The fineness modulus (FM) was calculated as the sum of the cumulative percentages retained on the 10, 5, 2.5, 1.25, 0.63, 0.315, and 0.160 mm sieves divided by 100; this procedure reproduces the FM values recorded in the laboratory reports.

Results and discussion

Chemical composition of the sand samples

The main chemical-analysis results are summarized in Table 1. The comparison focused primarily on the SiO_2 content, followed by Al_2O_3, Fe_2O_3, CaO, MgO, and alkali oxides.

Table 1. Chemical composition of the sand samples, wt.%

Parameter	Samarkand white sand	Samarkand yellow sand	Qibray fine sand	Qibray screened sand
LOI	0.46	0.47	2.60	1.76
SiO_2	96.42	94.53	83.33	86.86
Al_2O_3	1.85	1.48	5.75	3.04
Fe_2O_3	0.69	0.24	0.67	0.66
TiO_2	0.14	0.14	0.41	0.43
CaO	0.09	n.d.	0.60	2.37
MgO	0.25	0.40	0.45	0.48
SO_3	n.d.	n.d.	n.d.	0.01
K_2O	0.49	0.56	3.31	1.84
Na_2O	0.114	0.138	0.81	0.451
MnO	0.012	0.007	0.03	0.022
Cr_2O_3	0.033	0.017	0.07	0.049
Cl	0.002	n.d.	n.d.	n.d.

Parameter	Samarkand white sand	Samarkand yellow sand	Qibray fine sand	Qibray screened sand
Total	**100.55**	**97.98**	**98.03**	**97.97**

Note: oxide contents determined by EDXRF on fused glass beads; LOI according to GOST 8269.1 – 97; n.d. – not detected (below the reporting limit of the analysis); the total includes LOI.

Table 1 shows that Samarkand white sand and Samarkand yellow sand are characterized by the highest SiO_2 contents, 96.42 and 94.53 wt.%, respectively. These values exceed the 92.91 % SiO_2 reported by Mészárosová et al. for the reference quartz sand used in AAC technology [8], confirming the high siliceous character of both Samarkand materials. This result, however, does not imply identical hydrothermal reactivity, because reactivity also depends on particle size, quartz crystallinity, and autoclaving conditions [6,9].

In Qibray fine sand, SiO_2 decreases to 83.33 wt.%, while Al_2O_3, K_2O, and Na_2O increase to 5.75, 3.31, and 0.81 wt.%, respectively. Qibray screened sand contains 86.86 wt.% SiO_2 and is distinguished by 2.37 wt.% CaO, 3.04 wt.% Al_2O_3, and 1.84 wt.% K_2O. These relationships indicate that the proportion of non-silica associated components is higher in the two Qibray materials than in the Samarkand white and yellow sands. However, identification of feldspar, clay minerals, carbonate phases, or other specific minerals requires XRD; accordingly, mineralogical interpretations based solely on oxide composition remain tentative.

LOI values are very low for Samarkand white and yellow sands (0.46 and 0.47 wt.%, respectively), whereas Qibray fine sand and Qibray screened sand show values of 2.60 and 1.76 wt. %. A higher LOI may reflect volatile constituents, bound water, or secondary mineral phases, but additional thermal or mineralogical analyses are required before assigning the LOI to specific phases. Overall, on the basis of chemical composition, the Samarkand white and yellow sands exhibit the highest siliceous purity among the investigated samples.

The analytical totals including LOI are 100.55, 97.98, 98.03, and 97.97 wt.% (Table 1); this is acceptable for routine raw-material control but indicates that some minor constituents were not determined. For Qibray screened sand, if the 2.37 wt.% CaO were present entirely as calcite, the corresponding CO_2 would be about 1.86 wt.%, which is close to the measured LOI of 1.76 wt.%; this is consistent with, but does not prove, a carbonate contribution that should be verified by XRD or TGA.

XRF elemental composition of the Samarkand sand sample

The WDXRF results for the composite sample of the Samarkand deposit are summarized in Table 2. Since this sample characterizes the deposit as a whole, the data are used as an independent elemental characterization and cross-check of the Samarkand sands rather than as an additional material in the comparison; their agreement with Table 1 is discussed below (see Figure 3).

Table 2. XRF elemental composition of the Samarkand sand sample

Element	Mass fraction, wt.%	Element	Mass fraction, wt.%	Element	Mass fraction, wt.%
O	53.0	Ca	0.113	Cl	0.0099
Si	43.4	Mg	0.0999	Co	0.0052
Al	1.07	Ba	0.0262	Re	0.0037

Element	Mass fraction, wt.%	Element	Mass fraction, wt.%	Element	Mass fraction, wt.%
C	1.06	Ti	0.0221	Ni	0.0034
K	0.831	S	0.0178	Cu	0.0032
Fe	0.202	Zr	0.0173	Sr	0.0023
Na	0.115	P	0.0111	Rb	0.0017

Note: mass fractions as reported by the SQX software after normalisation (the sum of the listed elements is 100.0 wt.%).

XRF analysis identified O (53.0 wt.%) and Si (43.4 wt.%) as the dominant elements, with a combined fraction of 96.4 wt.%. This relationship supports the highly siliceous character of the sample; nevertheless, because oxygen is present in all oxide phases, the sum O+Si cannot be interpreted directly as SiO_2 content. Al and K were measured at 1.07 and 0.831 wt.%, respectively, indicating that associated components are minor relative to the dominant Si-O system. The C result of 1.06 wt.% was not interpreted as organic-matter content because quantitative XRF determination of light elements is sensitive to sample preparation and calibration conditions.

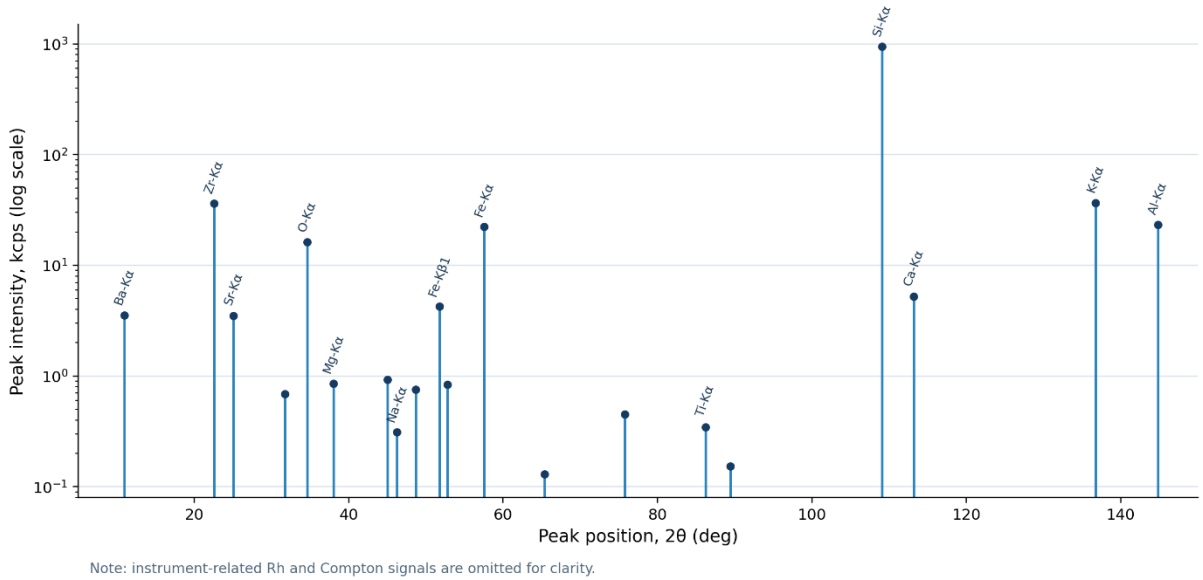


Figure 1. Selected XRF analytical peaks of the Samarkand sand sample

The Rigaku peak-identification report showed a dominant Si-Kα line at 109.068° with an intensity of 943.256 kcps. K-Kα (36.693 kcps), Al-Kα (23.150 kcps), Fe-Kα (22.296 kcps), and Ca-Kα (5.252 kcps) signals were also recorded. Peak intensities for different elements should not be interpreted directly as mass fractions because XRF sensitivity depends on atomic number, matrix effects, and the selected analytical line. Instrument-related Rh lines and Compton-scattering signals were not treated as sample constituents and are omitted from the simplified plot for clarity.

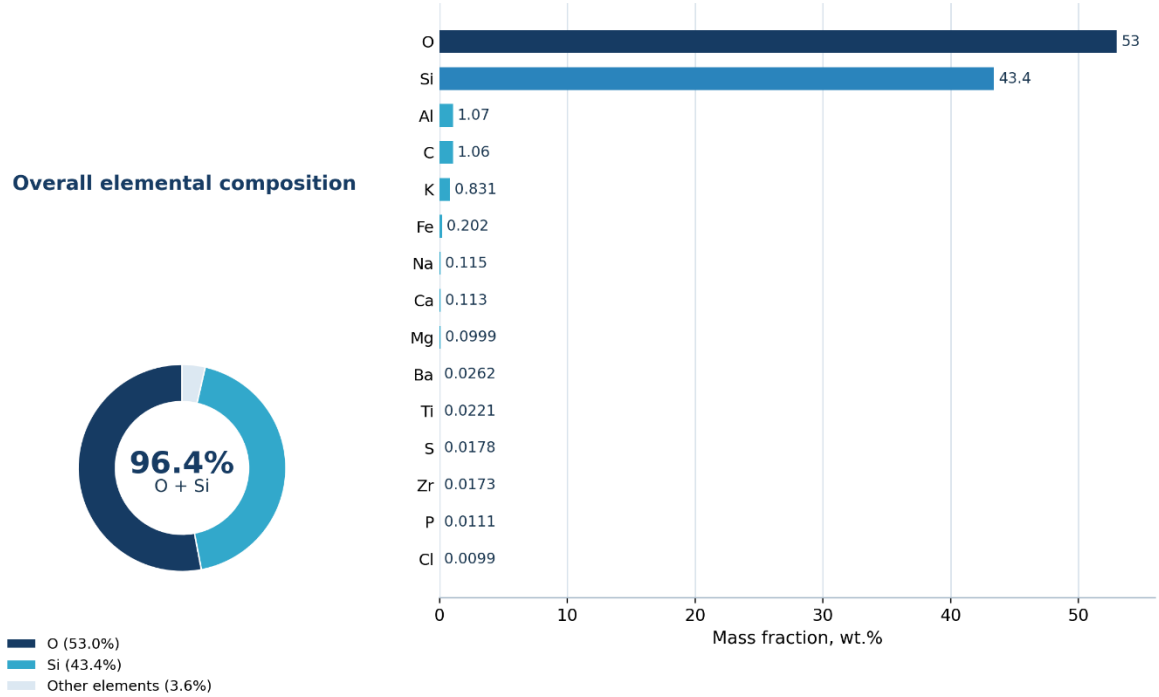


Figure 2. Overall XRF elemental composition of the Samarkand sand sample

Figure 2 summarizes the mass fractions of the detected elements. O and Si clearly dominate, whereas Al, C, and K occur at approximately 0.8 – 1.1 wt.% and each of the remaining elements is below 0.3 wt.%. This distribution is consistent with the predominance of silicate-related components. At the same time, XRF elemental data alone cannot quantify individual mineral phases such as quartz, feldspar, or clay minerals.

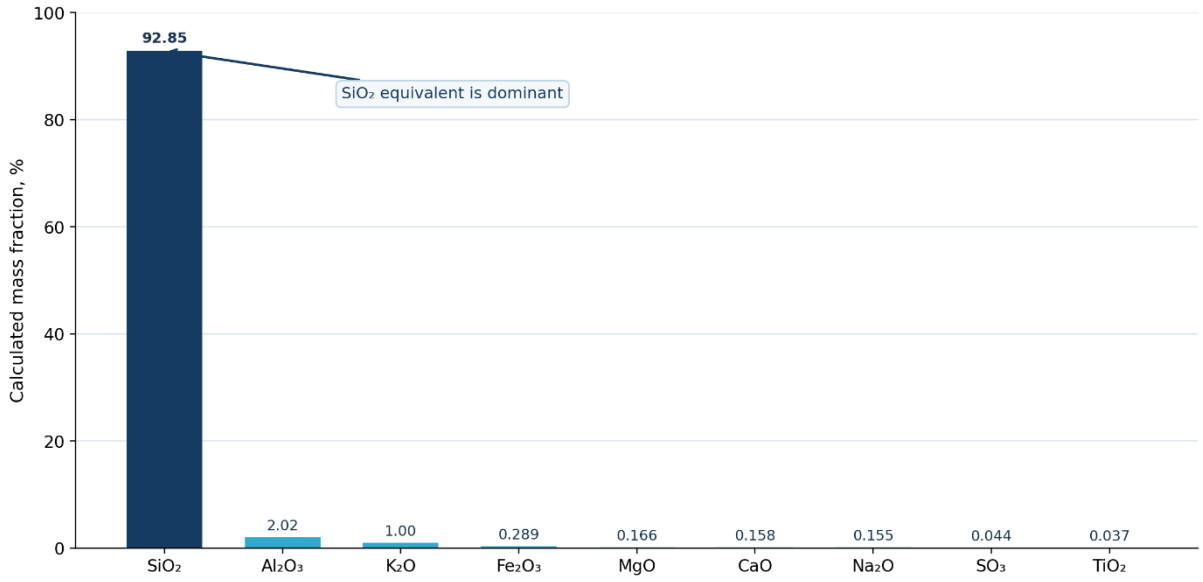


Figure 3. Stoichiometric oxide equivalents calculated from the XRF elemental data

Stoichiometric conversion of the elemental Si result gives an SiO_2 equivalent of 92.85 %. Using the same approach, the calculated equivalents are Al_2O_3 = 2.02 %, K_2O = 1.00 %, Fe_2O_3 = 0.289 %, MgO = 0.166 %, CaO = 0.158 %, Na_2O = 0.155 %, SO_3 = 0.044 %, and TiO_2 = 0.037 %. These values are calculated equivalents rather than oxide concentrations directly measured by XRF, and they do not represent mineral-phase fractions. Their sum is 96.7 %; the remaining 3.3 % of the

SQX-normalized result corresponds mainly to carbon (1.06 wt.%) and to oxygen not bound to the listed cations. For a direct comparison with Table 1, the equivalents were therefore normalized to their sum: the SiO_2 equivalent then becomes 96.0 %, which lies within the range of 94.53–96.42 wt. % determined for the Samarkand yellow and white sands. The normalized Fe_2O_3 equivalent (0.30 %) also falls within the range of Table 1; Al_2O_3 (2.09 %), CaO (0.16 %), and Na_2O (0.16 %) are slightly higher, MgO (0.17 %) is lower, and K_2O (1.03 %) is about twice the values in Table 1. This agreement confirms that the composite sample is representative of the siliceous character of the Samarkand deposit. The two approaches are complementary rather than interchangeable: the directly determined oxide contents (Table 1) remain the basis for raw-material acceptance and mix calculations, whereas the stoichiometric conversion of WDXRF elemental data offers a rapid independent cross-check of SiO_2 when only elemental results are available and additionally provides information on light and trace elements (C, Ba, Zr, Sr, etc.) that are not included in the routine oxide analysis.

Particle-size distribution of the sand samples

The sieve-analysis results are presented in Table 3. Because the initial grading may influence grinding time and the dispersion of the resulting sand slurry in AAC production, particle-size characteristics were evaluated together with chemical composition [1,6].

Table 3. Particle-size distribution of the sand samples, wt.%

Sieve/fraction	Samarkand white sand	Samarkand yellow sand	Qibray fine sand	Qibray screened sand
10 mm	0.00	0.39	0.07	0.00
5 mm	0.00	0.98	1.61	0.91
2.5 mm	0.00	1.12	2.26	3.98
1.25 mm	0.01	0.97	0.78	5.78
0.63 mm	0.02	1.94	1.17	6.59
0.315 mm	28.21	51.75	1.84	18.75
0.160 mm	68.53	32.97	10.88	41.44
Pan	3.23	9.88	81.36	22.55
Fineness modulus, FM	1.25	1.60	0.43	1.47
Fraction < 0.315 mm, %	71.76	42.85	92.24	63.99

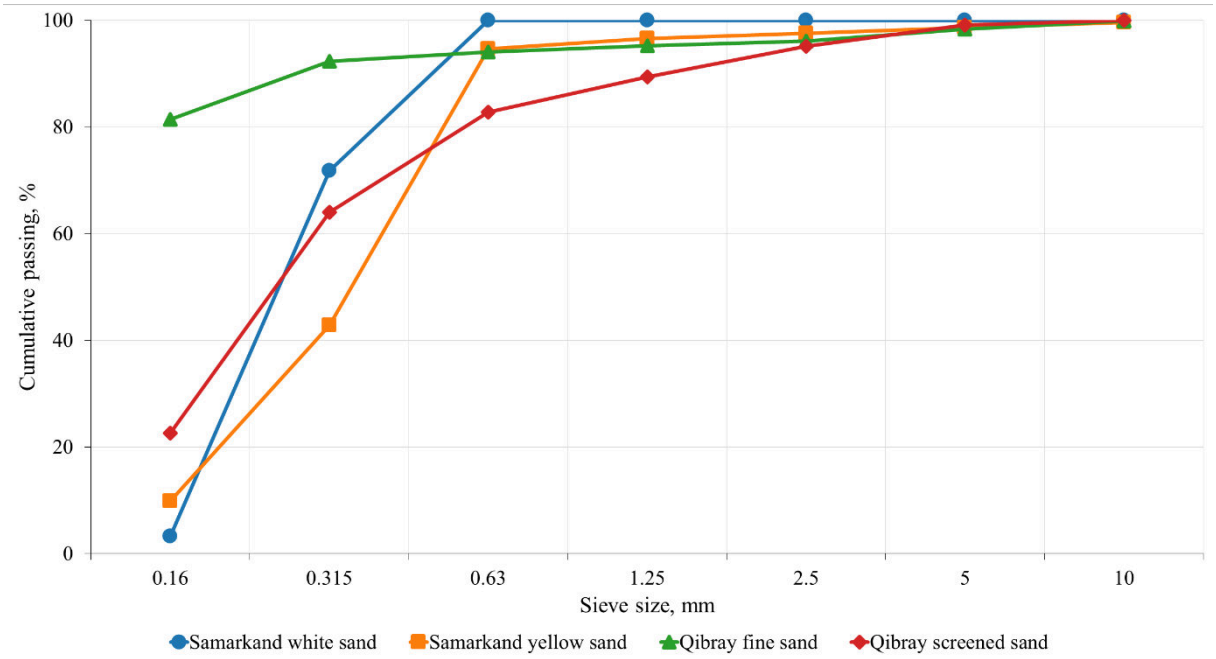


Figure 4. Cumulative particle-size distribution of the sand samples

Samarkand white sand contains almost no coarse fractions. The retained fraction on the 0.315 mm sieve is 28.21 %, while 68.53 % is retained on the 0.160 mm sieve. The calculated fraction passing 0.315 mm is 71.76 %, and the fineness modulus is 1.25. In Samarkand yellow sand, the 0.315 mm fraction is dominant at 51.75 %; the fraction finer than 0.315 mm is 42.85 %, and the FM is 1.60. Thus, the initial grading of the yellow sand is coarser than that of the white sand.

Qibray fine sand differs markedly from the other materials: 81.36 % of the sample passes to the pan, the fraction finer than 0.315 mm is 92.24 %, and the FM is only 0.43. Such a material may reduce grinding-energy demand, but its high proportion of fine particles may increase specific surface area and may therefore exert a stronger influence on water demand and slurry rheology. This interpretation is consistent with the importance of slurry consistency emphasized by Černý et al. [1,3]. Qibray screened sand has 63.99 % below 0.315 mm and an FM of 1.47. Its grading is intermediate between those of the Samarkand white and yellow sands, although the proportion of 1.25 – 5 mm particles is comparatively higher.

Integrated interpretation for AAC raw-material selection

Considering the chemical and granulometric results together shows that the advantages of the investigated raw materials are not identical. Samarkand white sand combines the highest SiO_2 content (96.42 wt.%) with a relatively fine initial grading. Samarkand yellow sand also contains a high level of SiO_2 (94.53 wt.%), but it has a larger proportion of the 0.315 mm fraction and a higher FM. This difference may affect mill loading and the time required to reach a target final fineness, although energy consumption was not measured directly in the present study.

Qibray fine sand is the finest material in terms of initial grading, but its SiO_2 content is only 83.33 wt.% and its Al_2O_3 and alkali-oxide contents are higher. Qibray screened sand has an intermediate FM, while its SiO_2 content is 86.86 wt.% and CaO reaches 2.37 wt.%. Therefore, a one-factor conclusion such as “the finest sand is the best raw material” or “the highest SiO_2 automatically produces the best AAC” is not justified. Isu et al. showed that the influence of quartz

particle size on reactivity and strength depends on autoclaving time [6,7], while more recent studies confirm the need to relate the chemical-mineralogical characteristics of the siliceous source to pore structure and final AAC performance [13,14].

The present stage of the study is limited to raw-material characterization. Accordingly, the current results cannot be used to claim absolute superiority of any sand source with respect to the strength, density, or thermal conductivity of the final AAC. A conclusive technological assessment requires parallel tests at identical mix proportions and autoclaving conditions, determination of the 45 and 90 μm residues after grinding, measurement of slurry density and flowability, XRD quantification of residual quartz and tobermorite, and testing of the dry density and compressive strength of the final AAC products.

Conclusion

1. Among the four investigated sand samples, the highest SiO_2 contents were recorded for Samarkand white sand (96.42 wt.%) and Samarkand yellow sand (94.53 wt.%). Qibray fine sand and Qibray screened sand contained 83.33 and 86.86 wt.% SiO_2, respectively, and showed comparatively higher levels of associated oxides such as Al_2O_3, K_2O, Na_2O, or CaO.

2. WDXRF analysis of the composite sample of the Samarkand deposit identified O (53.0 wt. %) and Si (43.4 wt.%) as the dominant elements. The stoichiometric SiO_2 equivalent calculated from the Si result was 92.85 %, or 96.0 % after normalization to the sum of oxide equivalents, which agrees with the SiO_2 contents of the Samarkand sands in Table 1 (94.53–96.42 wt.%). This value confirms the highly siliceous character of the deposit but does not represent the amount of a mineral phase; XRD is required to determine the quartz fraction.

3. The initial particle-size distributions differed substantially among the samples. The fineness moduli of Samarkand white sand, Samarkand yellow sand, Qibray fine sand, and Qibray screened sand were 1.25, 1.60, 0.43, and 1.47, respectively. The calculated fractions finer than 0.315 mm were 71.76, 42.85, 92.24, and 63.99 %, respectively. These differences may influence grinding behavior and slurry rheology.

4. Considering chemical purity and initial grading together, Samarkand white and yellow sands appear promising as siliceous raw materials for AAC production. However, because the present study is limited to raw-material characterization, the samples cannot yet be ranked conclusively in terms of final AAC performance.

5. Future work should test the sands under identical grinding, mix-design, and autoclaving conditions and relate slurry density and flowability, 45/90 μm residues, XRD phase composition, AAC dry density, compressive strength, and microstructure to the initial raw-material characteristics. Such an integrated approach would allow reliable assessment of the relationship between raw-material composition, dispersion, hydrothermal reactivity, and final product properties.

References

1. Černý V., Lédl M., Melichar J., Drochytka R. Influence of Type of Secondary Raw Material on Consistency of Fresh Mixture for AAC Production // Materials Science Forum. – 2020. – T. 998. – P. 305–310. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.998.305.

2. Akramaliyeva M.M., Abduxakimov T.T. Zamonaviy qurilishda energiya tejamkor va ekologik toza material sifatida avtoklavlangan gazobetonning o‘rni // «Atrof-muhitni asrashning zamonaviy ta’limiy talqini, mintaqaviy xususiyatlari, muammo va amaliy yechimlari» respublika ilmiy-amaliy anjumani materiallari. – 2025.
3. Akramaliyeva M.M., Abduxakimov T.T. Avtoklavli gazobeton ishlab chiqarishda qumning granulometrik tahlili natijalarining ahamiyati // «Innovatsion texnologiyalar va o‘simliklar resurslarini samarali boshqarish: oziq-ovqat, qishloq xo‘jaligi va kimyo sohalarida yangi yo‘nalishlar va imkoniyatlar» mavzusidagi xalqaro ilmiy-amaliy anjuman materiallari. B. 837–838. – Namangan: NamDTU, 2026.
4. Chen Y.-L., Chang J.-E., Lai Y.-C., Chou M.-I.M. A comprehensive study on the production of autoclaved aerated concrete: Effects of silica-lime-cement composition and autoclaving conditions // Construction and Building Materials. – 2017. – T. 153. – P. 622–629. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.116.
5. Galvánková L., Másilko J., Solný T. Štěpánková E. Tobermorite synthesis under hydrothermal conditions // Procedia Engineering. – 2016. – T. 151. – P. 100–107. – DOI: 10.1016/j.proeng. 2016.07.394.
6. Isu N., Ishida H., Mitsuda T. Influence of quartz particle size on the chemical and mechanical properties of autoclaved aerated concrete (I): Tobermorite formation // Cement and Concrete Research. – 1995. – T. 25, № 2. – P. 243–248. – DOI: 10.1016/0008–8846(95)00003-8.
7. Isu N., Teramura S., Ishida H., Mitsuda T. Influence of quartz particle size on the chemical and mechanical properties of autoclaved aerated concrete (II): Fracture toughness, strength and micropore // Cement and Concrete Research. – 1995. – T. 25, № 2. – P. 249–254. – DOI: 10.1016/0008–8846(95)00004-6.
8. Mészárosová L. Černý V., Melichar J., Ondříčková P., Drochytka R. The Usability of Metallurgical Production Waste as a Siliceous Component in Autoclaved Aerated Concrete Technology // Buildings. – 2024. – T. 14, № 10. – Art. 3155. – DOI: 10.3390/ buildings14103155.
9. Mitsuda T., Sasaki K., Ishida H. Phase evolution during autoclaving process of aerated concrete // Journal of the American Ceramic Society. – 1992. – T. 75, № 7. – P. 1858–1863. – DOI: 10.1111/j.1151–2916.1992.tb07208.x.
10. President of the Republic of Uzbekistan. Decree No. PF-21 of 16 February 2026 “On additional measures to consistently continue reforms and move them to a new stage within the priority directions of national development through 2030” [Электронный ресурс]. // National Database of Legislation of the Republic of Uzbekistan. URL: https://lex.uz/docs/-8050769 (accessed: 22.10.2026).
11. President of the Republic of Uzbekistan. Resolution No. PQ-436 of 2 December 2022 “On measures to improve the effectiveness of reforms aimed at the transition of the Republic of Uzbekistan to a green economy through 2030” [Электронный ресурс]. // National Database of Legislation of the Republic of Uzbekistan. URL: https://lex.uz/docs/-6303230 (accessed: 22.10.2026).

12. Qu X., Zhao X. Previous and present investigations on the components, microstructure and main properties of autoclaved aerated concrete – A review // Construction and Building Materials. – 2017. – T. 135. – P. 505–516. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.208.
13. Shi H., Zhou X., Zhang G., Li K., Chen C., Dong Z., Li J. Preparation of Portland Cement-Free Autoclaved Aerated Concrete Using Yellow River Sediment // Materials. – 2026. – T. 19, № 9. – Art. 1820. – DOI: 10.3390/ma19091820.
14. Ye H., Zhu B., Pan J., Chen X., Qu G. Solid waste-based low-carbon autoclaved aerated concrete: Relationship between engineering properties and microstructure // Journal of Building Engineering. – 2024. – T. 91. – Art. 109691. – DOI: 10.1016/j.jobe.2024.109691.

Received: 13.10.2026
Accepted: 25.10.2026
Published: 28.11.2026

УДК 546.623+628.35

Modern methods for the synthesis of basic aluminum chlorides and their application in the treatment of industrial wastewater from oil refineries

Gulomova Dilnoza Kudratovna
Doctoral candidate, Bukhara State Technical University
Republic of Uzbekistan, Bukhara
Narzullaeva Aziza Murodillaevna
PhD, Associate Professor
Department of Chemical Technology
Republic of Uzbekistan, Bukhara
E-mail: narzullaeva.aziza@yandex.ru
Umarov Boburbek Nosir ugli
PhD, Associate Professor
Department of Chemical Technology
Republic of Uzbekistan, Bukhara
Sadikova Mukhayo Muratovna
PhD, Associate Professor
Department of Chemical Technology Bukhara State Technical University
Republic of Uzbekistan, Bukhara
Berkinbaeva Aknur Sabitovna
Associate Professor
Department of Chemical Processes and Industrial Ecology, A.O. Boykanurov Mining and Metallurgical Institute
Kazakhstan, Almaty

Современные методы синтеза основных хлоридов алюминия и их применение для очистки промышленных сточных вод нефтеперерабатывающих заводов

Гуломова Дилноза Кудратовна
докторант
Бухарский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Бухара
Нарзуллаева Азиза Муродиллаевна
(PhD) доц.
кафедры Химическая технология, Бухарский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Бухара

Библиографическое описание: Современные методы синтеза основных хлоридов алюминия и их применение для очистки промышленных сточных вод нефтеперерабатывающих заводов // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Гуломова Д.К. [и др.]. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23664

For citation: Modern methods for the synthesis of basic aluminum chlorides and their application in the treatment of industrial wastewater from oil refineries // Universum: Technical Sciences : electronic scientific journal. Gulomova D.K. et al. 2026. No. 11(152). Available at: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23664

Умаров Бобурбек Носир угли
(PhD) доц.
кафедры Химическая технология, Бухарский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Бухара
Садикова Мухаё Муратовна
(PhD) доц.
кафедры Химическая технология, Бухарский государственный технический университет
Республика Узбекистан, Бухара
Беркинбаева Акнур Сабитовна
доц. кафедры Химические процессы и промышленная экология Горно-металлургический институт им. А.О. Бойканурова
Республика Казахстан, г. Алматы

Abstract

This paper examines modern methods for producing basic aluminum chlorides and their application in wastewater treatment processes. The authors provide a detailed analysis of chemical-technological approaches to the synthesis of aluminum chlorides and hydroxochlorides, utilizing metallic aluminum, aluminum oxide, aluminum-containing waste, and mineral raw materials. Particular attention is given to the mechanisms of hydrolysis and polymerization of aluminum compounds, which lead to the formation of highly efficient coagulants. By exploring the physicochemical principles governing the development of monomeric, dimeric, and polynuclear aluminum aqua-hydroxo complexes, the authors highlight their significant role in the coagulation and flocculation of impurities. It is demonstrated that the use of oxychloride coagulants accelerates sedimentation, enhances the removal of colloidal and finely dispersed impurities, and improves the quality of treated water. The study establishes that treatment efficiency is determined by hydrolysis conditions, pH levels, aluminum concentration, and the basicity of the coagulant. These findings confirm the potential of using aluminum hydroxochlorides in wastewater treatment technologies, including water treatment systems within the oil and gas and chemical industries.

The objective of this work is to substantiate the use of aluminum oxychloride for the treatment of industrial wastewater, including that typical of the oil and gas and chemical industries. Future research prospects involve optimizing the composition of coagulants, investigating their interaction with various types of pollutants, and developing integrated wastewater treatment technologies.

Аннотация

В работе рассматриваются современные методы получения основных хлоридов алюминия и их применение в процессах очистки сточных вод. Авторами подробно были проанализированы химико-технологические подходы к синтезу хлоридов и гидроксохлоридов алюминия с использованием металлического алюминия, оксида алюминия, алюминийсодержащих отходов и минерального сырья. Особое внимание авторами научной работы было уделено механизмам гидролиза и полимеризации соединений алюминия, приводящим к образованию коагулянтов с относительно большей эффективностью. Рассматривая физико-химические закономерности формирования мономерных, димерных и полиядерных аквагидроксокомплексов алюминия, также была отмечена их не самая последняя роль в процессах коагуляции и флокуляции примесей.

Показано, что использование оксихлоридных коагулянтов способствует интенсификации процессов осаждения, повышает эффективность удаления коллоидных и тонкодисперсных примесей, а также улучшает качество очищенной воды. Авторами данной работы было установлено, что эффективность очистки определяется условиями гидролиза, значениями pH, концентрацией алюминия и степенью основности коагулянта. Полученные результаты подтверждают перспективность применения гидроксохлоридов алюминия в технологиях очистки сточных вод, в том числе в системах водоподготовки на предприятиях нефтегазовой и химической промышленности.

Целью данной работы является обоснование применения оксихлорида алюминия для очистки промышленных сточных вод, в том числе характерных для нефтегазовой и химической отраслей. Перспективы дальнейших исследований связаны с оптимизацией состава коагулянтов, изучением их взаимодействия с различными видами загрязнений, а также с разработкой комплексных технологий очистки сточных вод.

Keywords: aluminum chlorides, coagulant, hydrolysis, polymerization, aquahydroxo complexes, coagulation, flocculation, wastewater, pH, aluminum hydroxide, oil and gas industry.

Ключевые слова: хлориды алюминия, коагулянт, гидролиз, полимеризация, аквагидроксокомплексы, коагуляция, флокуляция, сточные воды, pH, гидроксид алюминия, нефтегазовая промышленность.

Introduction. Wastewater treatment is one of the key tasks of modern environmental engineering and industrial technology, as the intensive development of industry is accompanied by a significant increase in the volume of polluted water entering the environment. This problem is particularly relevant for enterprises in the oil and gas, chemical, metallurgical, and processing industries, where complex wastewater with a wide range of pollutants is formed during production. Such pollutants include suspended solids, oil products, phenols, surface-active compounds, heavy metals, and various toxic organic components capable of negatively affecting aquatic ecosystems and human health. In this regard, the development of effective, cost-effective, and environmentally safe methods for wastewater treatment is of particular importance.

One of the most widely used purification directions is the use of coagulation methods based on the introduction of special reagents – coagulants – into the purified water, which facilitate the enlargement and subsequent precipitation of fine-dispersed and colloidal particles. Among various coagulants, aluminum compounds occupy a special place due to their high coagulation capacity, accessibility, and relatively low cost. In recent decades, increasing attention has been paid to basic aluminum chlorides, particularly aluminum oxychloride (polyaluminum chloride), which is characterized by higher efficiency compared to traditional coagulants such as aluminum sulfate.

Interest in aluminum oxychloride is driven by its unique physicochemical properties, which are linked to its ability to form various hydrolyzed forms in aqueous solutions—from monomeric aquaions to complex polynuclear hydroxocomplexes. These compounds play a key role in coagulation mechanisms, ensuring the neutralization of colloidal particle charges, their aggregation, and the formation of durable flocculas that are easily removed from water. The processes of

hydrolysis and polymerization of aluminum compounds depend on a number of factors, including the pH value of the medium, reagent concentration, temperature, and the basicity of the coagulant. Understanding these patterns is a necessary condition for optimizing water purification processes.

Interest in aluminum oxychloride is driven by its unique physicochemical properties, which are linked to its ability to form various hydrolyzed forms in aqueous solutions – from monomeric aquaions to complex polynuclear hydroxocomplexes. These compounds play a key role in coagulation mechanisms, ensuring the neutralization of colloidal particle charges, their aggregation, and the formation of durable flakes that are easily removed from water. The processes of hydrolysis and polymerization of aluminum compounds depend on a number of factors, including the pH value of the medium, reagent concentration, temperature, and the basicity of the coagulant. Understanding these patterns is a necessary condition for optimizing water purification processes.

The objective of this work is to substantiate the use of aluminum oxychloride for the treatment of industrial wastewater, including that typical of the oil and gas and chemical industries. Future research prospects involve optimizing the composition of coagulants, investigating their interaction with various types of pollutants, and developing integrated wastewater treatment technologies.

Materials and methods

Aluminum chloride can be produced by passing chlorine or hydrogen chloride over red-hot aluminum shavings. In this process, the aluminum must be protected from oxidation. Therefore, the yield of aluminum chloride increases in the presence of a reducing agent, for example, by adding carbon (charcoal or coke). The presence of impurities in metallic aluminum, especially iron and silicon, enhances the volatilization of aluminum chloride and prevents the formation of a protective oxide film [1].

The reaction between aluminum and hydrochloric acid begins at approximately 250 °C and proceeds intensively at dark-red heat conditions and with a rapid flow of HCl gas. Aluminum chloride can also be obtained through hydrogen chloride treatment of aluminum alloys containing copper, tin, or magnesium at temperatures of 200-300 °C [2,3].

Aluminum oxide reacts with chlorine at high temperatures in the presence of a reducing agent (carbon) according to the reaction [4]:

$$\mathbf{Al_2O_3 + 3C + 3Cl_2 \rightarrow 2AlCl_3 + 3CO + 196.6\ kJ/mol}$$

This reaction begins at about 700 °C and proceeds intensively at around 1000 °C. Bauxite, clay, and other aluminum-containing ores, as well as coal ash, can be used as natural raw materials for aluminum chloride production.

Aluminum chloride may also form by heating certain metal chlorides with aluminum oxide, bauxite, and other aluminum ores that have a lower affinity for chlorine than aluminum. Aluminum oxide can be converted into chloride by heating with sulfur chlorides, especially effectively when a mixture of sulfur chloride and chlorine is used. In this case, lower temperatures (700–850 °C) are sufficient compared to pure chlorine treatment. Sulfur-containing compounds, carbon monoxide, and processed natural gases may be used as reducing agents.

Pentahydroxyaluminum chloride can be obtained from desilicated aluminate solutions containing about 70 g/dm³ Al_2O_3 through rapid carbonation at 20-30 °C and pH 11.4-11.8 within one hour. Increasing temperature and aluminum oxide concentration negatively affects the quality of the resulting aluminum hydroxide. The precipitated $Al(OH)_3$ is separated by filtration, washed with water at 25–35 °C, and dissolved in hydrochloric acid upon heating [4-5]:

$$\mathbf{2Al(OH)_3 + HCl \rightarrow Al_2(OH)_5Cl + H_2O}$$

During dissolution, the pH is maintained at 4–4.5. The concentration of hydrochloric acid has little effect on the process. The resulting solution is evaporated and dried to obtain a solid product $Al_2(OH)_5Cl{\cdot}2.5H_2O$ containing 42-43 % Al_2O_3.

A process has been developed for producing aluminum hydroxychloride by dissolving activated aluminum hydroxide in hydrochloric acid. Technical aluminum hydroxide is dried in a rotary kiln at 110-130 °C and then thermally dehydrated in a pneumatic separator. The activated hydroxide is collected in a cyclone and fed into enamel-coated reactors where it reacts with hydrochloric acid at 95–98 °C for 40–60 minutes:

$$\mathbf{Al(OH)_3 + HCl \rightarrow AlCl_3 + H_2O}$$

The resulting solution is separated from insoluble residues using a settling centrifuge and transferred to a storage tank. The centrifuged residue is further dissolved in concentrated hydrochloric acid (30 %) at 95–100 °C for 1–2 hours to obtain aluminum chloride. When approximately 75 % of the hydroxide is converted, the process becomes cyclic, producing solutions with a basicity of 1.8–1.9 and containing about 15 % Al_2O_3.

To accelerate sedimentation, improve filtration rates, and remove fine suspended and colloidal particles from wastewater and drinking water, coagulants are widely used. Aluminum hydroxychlorides are among the most effective coagulants. Upon hydrolysis, they form aluminum hydroxides, which destabilize colloidal particles and promote their aggregation into larger flocs, thereby enhancing sedimentation.

Theoretical Basis and Mechanism of Coagulation with Aluminum Salts. In dilute aqueous solutions with pH < 3, aluminum exists as an aquacomplex $[Al(H_2O)_6]^{3+}$ with an octahedral structure. Each water molecule in the primary coordination sphere is hydrogen-bonded to molecules in the secondary sphere. As pH increases above 3 (typically 3.8-4.9), monomeric aquahydroxo complexes begin to form [6].

Further increase in aluminum concentration and OH^-/Al^{3+} ratio leads to hydrolytic polymerization, forming dimers such as $[Al_2(H_2O)_8(OH)_2]^{4+}$. These dimers consist of two octahedra linked by hydroxide bridges. Continued polymerization can produce tetramers and larger poly-nuclear complexes such as $[Al_6(H_2O)_{12}(OH)_{12}]^{6+}$, structurally similar to gibbsite (hydrargillite) [6].

At higher pH values (>5), further polymerization leads to the formation of large poly-nuclear complexes like $[Al_{18}(H_2O)_{12}(OH)_{48}]^{6+}$, which behave as micelles with sizes on the order of 0.0018-0.0024 μm. These micelles aggregate through hydrogen bonding and van der Waals forces, forming larger flocs. [7-8]

During coagulation, hydrolysis reactions neutralize surface charges of dispersed particles, promoting aggregation [9]. Positively charged aluminum complexes can adsorb onto negatively charged contaminants, leading to heterocoagulation.

Micelle aggregation proceeds rapidly in the regime of fast coagulation, where particles undergoing Brownian motion collide and stick together. This process is described by the Smoluchowski theory of coagulation kinetics [10].

As coagulants such as aluminum hydroxychloride are introduced into the system, repulsive forces between particles decrease due to charge neutralization, allowing van der Waals attraction to dominate. As a result, spherical aggregates (~0.02 μm) form, with active surface centers consisting of poly-nuclear aluminum hydroxo complexes [9].

Results and discussion

During the conducted research, the scientific foundations of obtaining basic aluminum chlorides, their physicochemical properties, and the specifics of their application in wastewater treatment processes were examined. It has been shown that aluminum oxychloride is a highly effective coagulant capable of significantly intensifying the processes of clarification and removal of pollutants of various natures. Its effectiveness is due to its ability to form a wide range of hydrolyzed forms in aqueous solutions, ranging from monomeric to polynuclear aquahydroxy complexes that actively participate in coagulation and flocculation processes.

Analysis of existing methods for producing basic aluminum chlorides has shown that technologies based on the use of activated aluminum hydroxide, aluminum-containing mineral raw materials, and industrial waste are the most promising. Such approaches not only allow for the production of high-quality coagulants with specified properties but also contribute to the rational use of resources and the reduction of environmental impact. Selecting the starting material is of particular importance, as its composition and physicochemical characteristics directly affect the activity and stability of the final product.

Conclusion

The practical significance of the work lies in substantiating the use of aluminum oxychloride for treating industrial wastewater, including those characteristic of the oil and gas and chemical industries. The use of this coagulant allows for an increase in the degree of water purification, reduces the time required for technological processes, and improves the quality of purified water, which is especially important in conditions of tightening environmental requirements.

Thus, the research results confirm the expediency of further developing and implementing technologies for the production and application of basic aluminum chlorides in water treatment systems. The prospects for further research are related to optimizing the composition of coagulants, studying their interaction with various types of contaminants, and developing integrated technologies for wastewater treatment.

References

1. Furman A.A. Inorganic Chlorides (Chemistry and Technology) / A.A. Furman. – Moscow: Khimiya, 1980. – 416 P.

2. L.A. Kulsky, 1968: Catalog of the State Public Scientific and Technological Library (GPNTB) of Russia. Entry: «Theoretical Foundations of Water Purification Technology…», Kyiv: Naukova Dumka, 1968, 127 P.
3. Fridlyander I.N. (ed.). Physical Metallurgy of Aluminum and Its Alloys: A Handbook / A.I. Belyaev, O.S. Bochvar, N.N. Buynov, et al. – 2nd ed., revised and supplemented. 279 P. – Moscow: Metallurgiya, 1983.
4. Radchenko, S.S. Method for isolating water inflow into oil production wells: Patent 2396419, Russian Federation: IPC E21B 43/138 / S.S. Radchenko, I.A. Novakov, F.S. Radchenko [et al.]; applicant and patent holder: Volgograd State Technical University. – No. 2009128832/03; filed July 27, 2009; published August 10, 2010, Bulletin No. 22 // (accessed: November 20. – 2026.
5. S.V. Yakovlev and Yu. V. Voronov, 2004: Great Russian Encyclopedia. Entry: «Water Disposal and Wastewater Treatment,» Moscow: ASV, 2004,.
6. Sun, Z. One-dimensional infinite chain structures of $[Al_2(OH)_4(H_2O)_4]X_2$ (X = I, Br, Cl): an aggregate of Al_2 species and a precursor of $Al(OH)_3$ / Z. Sun, H. Wang, Y. Zhang [и др.] // Dalton Transactions. – 2013. – Vol. 42. – P. 12956–12963. – DOI: 10.1039/C3DT50811K.
7. Hem, J.D. Form and stability of aluminum hydroxide complexes in dilute solution / J.D. Hem, C.E. Roberson. – Washington, DC: U.S. Government Printing Office, 1967. – IV, 55 P.: ill. – (Geological Survey Water-Supply Paper; 1827-A). – DOI 10.3133/wsp1827A.
8. Gregory, J. Hydrolyzing metal salts as coagulants / J. Gregory, J. Duan // Pure and Applied Chemistry. – 2026. – Vol. 73, No. 12. – P. 2017–2026. – DOI: 10.1351/pac200173122017.
9. Smoluchowski, M. von. Versuch einer mathematischen Theorie der Koagulationskinetik kolloider Lösungen / M. von Smoluchowski // Zeitschrift für Physikalische Chemie. – 1918. – Vol. 92, No. 1. – P. 129–168. – DOI: 10.1515/zpch-1918-9209.

Received: 29.10.2026
Accepted: 02.11.2026
Published: 28.11.2026

УДК 546.562:547.495.9

DOI: 10.32743/UniTech.2026.152.11.23651

Recovery of thiocyanate from waste guanidine thiocyanate as copper(I) thiocyanate and the acid–base rationale for obtaining guanidinium polyacrylate

Qudratov Oston
Doctoral student (PhD)
Bukhara State Technical University
Republic of Uzbekistan, Bukhara
E-mail: chemistry2927@mail.ru

Olimov Bobir
PhD
docent, Bukhara State Technical University
Republic of Uzbekistan, Bukhara
ORCID: 0000-0001-6562-1885
E-mail: b.b.olimov@gmail.com

Akhmedov Vokhid
DSc, Professor
Bukhara State Technical University
Republic of Uzbekistan, Bukhara
ORCID: 0000-0002-4634-7814
E-mail: voxid7@mail.ru

Выделение тиоцианата из отходного роданида гуанидина в виде тиоцианата меди(I) и кислотно-основное обоснование получения полиакрилата гуанидиния

Кудратов Остон Хайруллаевич
докторант (PhD)
Бухарский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Бухара

Олимов Бобир Баходирович
PhD, доц.
Бухарский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Бухара

Библиографическое описание: Кудратов О.Х., Олимов Б.Б., Ахмедов В.Н. Выделение тиоцианата из отходного роданида гуанидина в виде тиоцианата меди(I) и кислотно-основное обоснование получения полиакрилата гуанидиния // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23651

For citation: Qudratov O., Olimov B., Akhmedov V. Recovery of thiocyanate from waste guanidine thiocyanate as copper(I) thiocyanate and the acid–base rationale for obtaining guanidinium polyacrylate // Universum: Technical Sciences : electronic scientific journal. 2026. No. 11(152). Available at: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23651

Ахмедов Вохид Низомович
PhD, проф.
Бухарский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Бухара

Abstract

The aim of the work was to substantiate a safe way of removing the thiocyanate ion from waste guanidine thiocyanate while retaining the guanidinium cation, and to establish the conditions under which the resulting guanidine hydrochloride can be bound to an acrylic fragment. Methods: ATR-FTIR spectroscopy, X-ray powder diffraction, gravimetry, and thermodynamic calculations based on standard electrode potentials and acid–base equilibria. In the presence of metallic copper, thiocyanate is precipitated by copper(II) chloride through the synproportionation $Cu^{2+} + Cu^{0} + 2SCN^{-} \rightarrow 2CuSCN\downarrow$ ($\Delta E° = +1.14$ V, lg K = 19.3) without formation of thiocyanogen or acid; the CuSCN yield was 92 %, and guanidinium remains in solution as the chloride. The metathesis of guanidine hydrochloride with acrylic acid is thermodynamically forbidden ($K \approx 7\cdot10^{-11}$, $\Delta G° \approx +58$ kJ/mol): in a mixture of 2 M guanidine hydrochloride and 2 M acrylic acid (pH 1.98) the acrylate fraction is only 0.53 %, and the IR spectrum of the product corresponds to partially polymerised acrylic acid dominated by non-ionised COOH groups. Binding guanidinium to the acrylic fragment therefore requires ionisation of the carboxyl groups ($pH \geq pKa + 2$), and a route to guanidinium polyacrylate by neutralising poly(acrylic acid) with NaOH in the presence of guanidine hydrochloride is proposed. Practical significance: the process avoids nitric acid and acidic effluents and yields two products – marketable CuSCN and a guanidinium modifier for adhesive compositions.

Аннотация

Цель работы – обосновать безопасный способ удаления тиоцианат-иона из отходного роданида гуанидина с сохранением гуанидиниевого катиона и определить условия, при которых полученный хлорид гуанидина может быть связан с акриловым фрагментом. Методы: ИК-Фурье спектроскопия (НПВО), рентгенофазовый анализ, гравиметрия, термодинамический расчёт по стандартным электродным потенциалам и кислотно-основным равновесиям. Установлено, что в присутствии металлической меди тиоцианат осаждается хлоридом меди(II) по реакции сопропорционирования $Cu2+ + Cu0 + 2SCN- \rightarrow 2CuSCN\downarrow$ ($\Delta E° = +1{,}14$ В, lg K = 19,3) без образования тиоциана и кислоты; выход CuSCN составил 92 %, а гуанидиний остаётся в растворе в виде хлорида. Показано, что обменная реакция хлорида гуанидина с акриловой кислотой термодинамически запрещена ($K \approx 7\cdot10-11$, $\Delta G° \approx +58$ кДж/моль): в смеси 2 М хлорида гуанидина и 2 М акриловой кислоты (pH 1,98) доля акрилат-аниона составляет 0,53 %, а ИК-спектр продукта отвечает частично полимеризованной акриловой кислоте с преобладанием неионизированных групп COOH. Сделан вывод, что связывание гуанидиния с акриловым фрагментом требует ионизации карбоксильных групп ($pH \geq pKa + 2$); предложена схема получения полиакрилата гуанидиния нейтрализацией полиакриловой кислоты в присутствии NaOH. Практическая значимость: процесс исключает азотную кислоту и кислые стоки и даёт два продукта – товарный CuSCN и гуанидиниевый модификатор для клеевых композиций.

Keywords: guanidine thiocyanate, copper(I) thiocyanate, synproportionation, guanidine hydrochloride, acid–base equilibrium, guanidinium polyacrylate.

Ключевые слова: роданид гуанидина, тиоцианат меди(I), сопропорционирование, хлорид гуанидина, кислотно-основное равновесие, полиакрилат гуанидиния.

Acknowledgements: the authors used the AI assistant Claude (Anthropic) to structure the text and for language editing; all experimental data, calculations and conclusions were obtained and verified by the authors.

Благодарности: при подготовке рукописи авторы использовали ИИ-ассистент Claude (Anthropic) для структурирования текста и языкового редактирования; все экспериментальные данные, расчёты и выводы получены и проверены авторами.

Introduction

Funding: this study received no external funding.

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Thiocyanate-containing wastes are a persistent environmental problem: the SCN− ion is toxic to aquatic organisms, resistant to biological treatment in the presence of heavy metals and is usually destroyed by oxidative or biological methods that consume the anion without recovering its value [12; 17]. Electrochemical oxidation, for instance, converts thiocyanate into sulfate, cyanate and, under certain conditions, cyanide-containing intermediates [15]. For industrial guanidine thiocyanate wastes the situation is different, because the cation of the salt – guanidinium – is itself a valuable building block. Guanidinium groups are the active centres of a wide family of non-leaching antimicrobial polymers and coatings [3; 6; 9; 13], and the guanidinium cation remains protonated over practically the whole pH range used in technology [19]. A rational processing scheme should therefore remove the thiocyanate anion selectively and preserve the guanidinium cation.

Precipitation of thiocyanate as copper(I) thiocyanate is attractive for two reasons. CuSCN is one of the least soluble salts of thiocyanate ($K_{sp} = 1.77 \cdot 10^{-13}$ [4]) and is itself a marketable product: it is used as a biocide in antifouling paints [10] and as an inexpensive inorganic hole-transport material in perovskite and organic solar cells [1; 16; 18]. However, copper(II) salts oxidise thiocyanate, and precipitation with Cu^{2+} alone is accompanied by the formation of thiocyanogen, whose hydrolysis gives toxic products. The first task of this work was therefore to find conditions under which thiocyanate is precipitated quantitatively as CuSCN without oxidation and without generation of acid.

The second task concerns the further use of the guanidine hydrochloride obtained. In our previous work, guanidine acrylate was considered as a cationic modifier of composite adhesives [11]. Here we analyse quantitatively whether such a salt can be formed directly from guanidine hydrochloride and acrylic acid, compare the thermodynamic prediction with the IR spectrum of the product, and derive from this analysis the conditions for obtaining guanidinium polyacrylate.

Materials and methods

Materials. Waste guanidine thiocyanate $[C(NH_2)_3]SCN$ (technical grade, industrial waste), copper(II) chloride dihydrate $CuCl_2 \cdot 2H_2O$, copper turnings (Cu^0, ≥ 99 %), acrylic acid (99 %, stabilised with hydroquinone monomethyl ether), iron(III) chloride and silver nitrate (analytical grade) and distilled water were used.

Precipitation of CuSCN. Copper turnings were introduced into a 20 % aqueous solution of guanidine thiocyanate, and a 0.1–0.5 M solution of $CuCl_2$ was added dropwise with stirring at 20–30 °C until precipitation ceased (molar ratio GuSCN: Cu^{2+}: Cu^0 = 2: 1: 1). The precipitate was separated by vacuum filtration, washed with distilled water until the washings gave no reaction for chloride ($AgNO_3$ test), and dried at 60–80 °C to constant mass. The yield was determined gravimetrically; residual thiocyanate in the filtrate was checked qualitatively with $FeCl_3$. The filtrate containing guanidine hydrochloride was used in the next step.

Reaction of guanidine hydrochloride with acrylic acid. Acrylic acid was added to the guanidine hydrochloride solution (molar ratio 1: 1) at 20–40 °C with continuous stirring and without any neutralising agent.

Instrumental methods. IR spectra were recorded on a SHIMADZU FTIR spectrometer in the attenuated total reflectance mode (QATR) in the range 400–4000 cm^{-1} with a resolution of 4 cm^{-1} [2]. The phase composition of the precipitate was determined by X-ray powder diffraction (Cu Kα radiation, 2θ = 10–75°).

Calculations. Standard potentials of the couples involving CuSCN were calculated from E°(Cu^{2+}/Cu^+), E°(Cu^+/Cu) and K_{sp}(CuSCN) [4]; the equilibrium constant of synproportionation was found from $\lg K = n\Delta E°/0.05916$ (n = 1, 25 °C). The fraction of acrylate anion was calculated as $\alpha(A^-) = 1/(1 + 10^{pKa - pH})$ with pK_a(acrylic acid) = 4.25 [4]; the pH of the acid solution was estimated from $[H^+] = (K_a c)^{1/2}$. The acidity of hydrochloric acid in water was taken as $pK_a \approx -5.9$ [14].

Results and discussion

Characterisation of the waste. The IR spectrum of the waste guanidine thiocyanate (Fig. 1, Table 1) contains the strongest absorption of the whole spectrum at 2051.54 cm^{-1} (transmittance down to 28 %), which is the unambiguous diagnostic band of the free, non-coordinated SCN^- anion: other functional groups practically do not absorb in the 2000–2100 cm^{-1} region. The broad N–H stretching envelope at 3363–3165 cm^{-1}, the C=N stretching band at 1606 cm^{-1} and the N–H/C–N bands at 1412 and 1378 cm^{-1} belong to the guanidinium cation; the bands at 721 and 634 cm^{-1} confirm the thiocyanate anion. The width of the N–H envelope indicates an extensive network of intermolecular hydrogen bonds, which is typical of the guanidinium cation with its six N–H donors [8]. The material is thus an ionic salt suitable for further processing, and the task is reduced to removing SCN^- without loss of the cation.

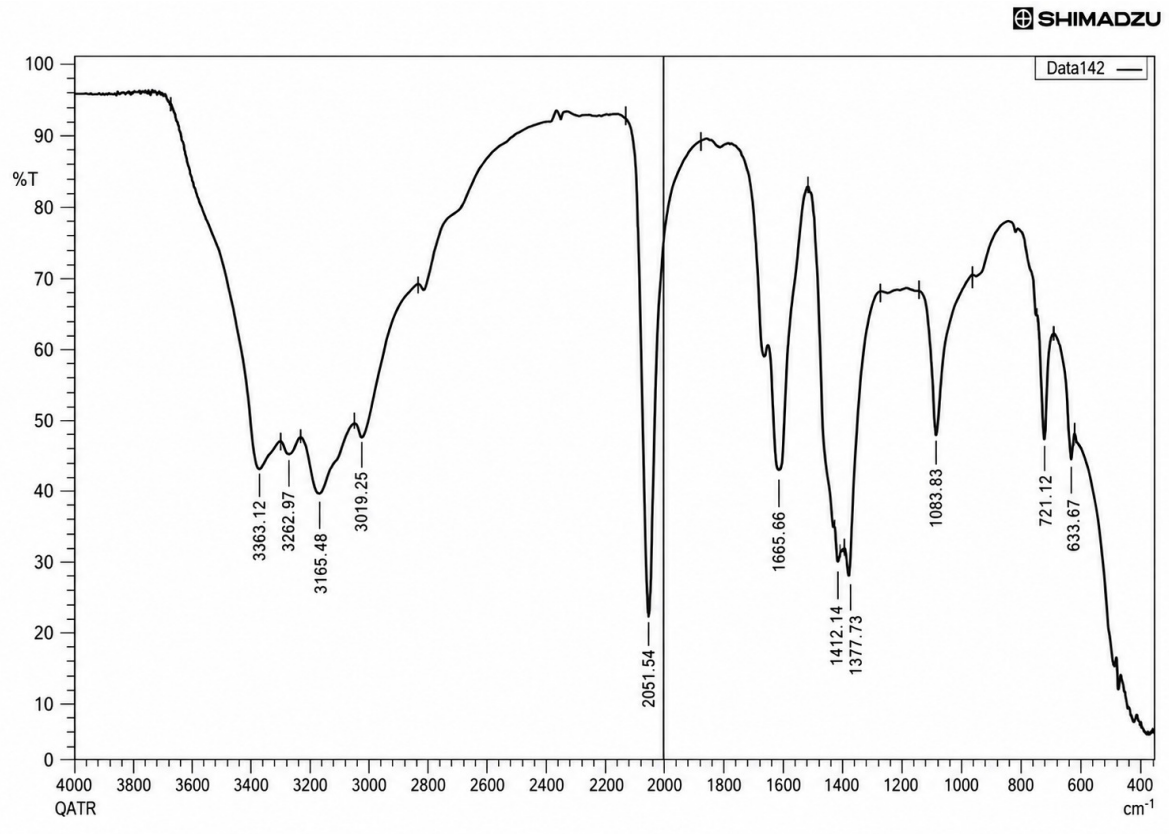


Figure 1. IR spectrum (ATR-FTIR) of waste guanidine thiocyanate

Table 1. Main IR absorptions of waste guanidine thiocyanate

ν, cm^{-1}	Assignment	Comment
3363, 3263, 3165	ν(N–H)	guanidinium NH_2 groups; broad band due to H-bonding
3019	ν(N–H^+)	protonated amino groups
2052	ν(C≡N) of SCN^-	diagnostic band of free thiocyanate; very strong, narrow
1606	ν(C=N)	protonated amidine (guanidinium) structure
1412, 1378	δ(N–H), ν(C–N)	ionic guanidinium
1084	ν(C–N)	characteristic of guanidinium salts
721; 634	ν(C–S); δ(SCN)	additional evidence of SCN^-

Thermodynamics of thiocyanate precipitation. From $E°(Cu^+/Cu) = +0.521$ V, $E°(Cu^{2+}/Cu^+) = +0.153$ V and $K_{sp}(CuSCN) = 1.77\cdot10^{-13}$ [4] the standard potentials of the couples Cu^{2+}/CuSCN and CuSCN/Cu^0 are +0.91 and −0.23 V, respectively. For the synproportionation

$$Cu^{2+} + Cu^0 + 2SCN^- \rightarrow 2CuSCN\downarrow \quad (1)$$

$\Delta E° = +1.14$ V, which corresponds to lg K = 19.3 and $\Delta G° = -110$ kJ/mol. The reaction is therefore practically irreversible, and in molecular form it does not produce acid:

$$2[C(NH_2)_3]SCN + CuCl_2 + Cu \rightarrow 2CuSCN\downarrow + 2[C(NH_2)_3]Cl \quad (2)$$

Without a reductant the situation is different. Since $E°(Cu^{2+}/CuSCN)$ exceeds the potential of the thiocyanogen couple ($(SCN)_2/SCN^-$, about +0.77 V [4]), copper(II) oxidises thiocyanate:

$$2Cu^{2+} + 4SCN^{-} \rightarrow 2CuSCN\downarrow + (SCN)_2 \quad (3)$$

so that half of the thiocyanate is lost as thiocyanogen, which hydrolyses in water to toxic products. Metallic copper reduces Cu^{2+} to Cu^{+} faster than the oxidation of SCN^{-} develops and thereby closes this pathway. Equation (2) also shows that the process consumes no acid and releases none: the guanidinium cation stays in solution together with chloride, and the filtrate can be used directly in the next step without crystallisation of an intermediate salt or neutralisation of acidic effluents.

Yield and phase composition of the precipitate. Addition of the $CuCl_2$ solution produced a white precipitate immediately. The white colour itself is indicative, because copper(II) compounds are blue or green, so that the colour confirms the reduction of copper(II) to copper(I). The yield of CuSCN was 94.7 g per 100 g of guanidine thiocyanate, i.e. 92 % of the theoretical value (102.9 g) (Table 2). The stoichiometry of reaction (2) corresponds to 72.1 g $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ and 26.9 g of copper per 100 g of guanidine thiocyanate, and 80.9 g of guanidine hydrochloride remains in the filtrate.

Table 2. Characteristics of the copper(I) thiocyanate precipitate

Parameter	Expected	Obtained	Method
Colour	white / light grey	white	visual
Yield	102.9 g per 100 g GuSCN	94.7 g (92 %)	gravimetric
Phase composition	CuSCN	CuSCN (Fig. 2)	XRD
SCN^{-} in filtrate	minimal	qualitative test	$FeCl_3$ test

The X-ray diffraction pattern of the precipitate (Fig. 2) shows a set of sharp reflections at 2θ = 27.2° (d = 3.28 Å, the most intense), 28.8° (3.09 Å), 32.6° (2.74 Å), 34.6° (2.59 Å), 47.1° (1.93 Å) and 49.9° (1.83 Å), indexed as (101), (012), (006), (104), (110) and (113), together with weaker lines at 16.2°, 38.4°, 52.2°, 55.3°, 59.7°, 62.3° and 68.9°. The pattern corresponds to crystalline copper(I) thiocyanate; no reflections of metallic copper or basic copper(II) salts are seen. The slow, dropwise addition of the $CuCl_2$ solution is important: at high local supersaturation nucleation outruns crystal growth and a fine, poorly filterable precipitate is formed.

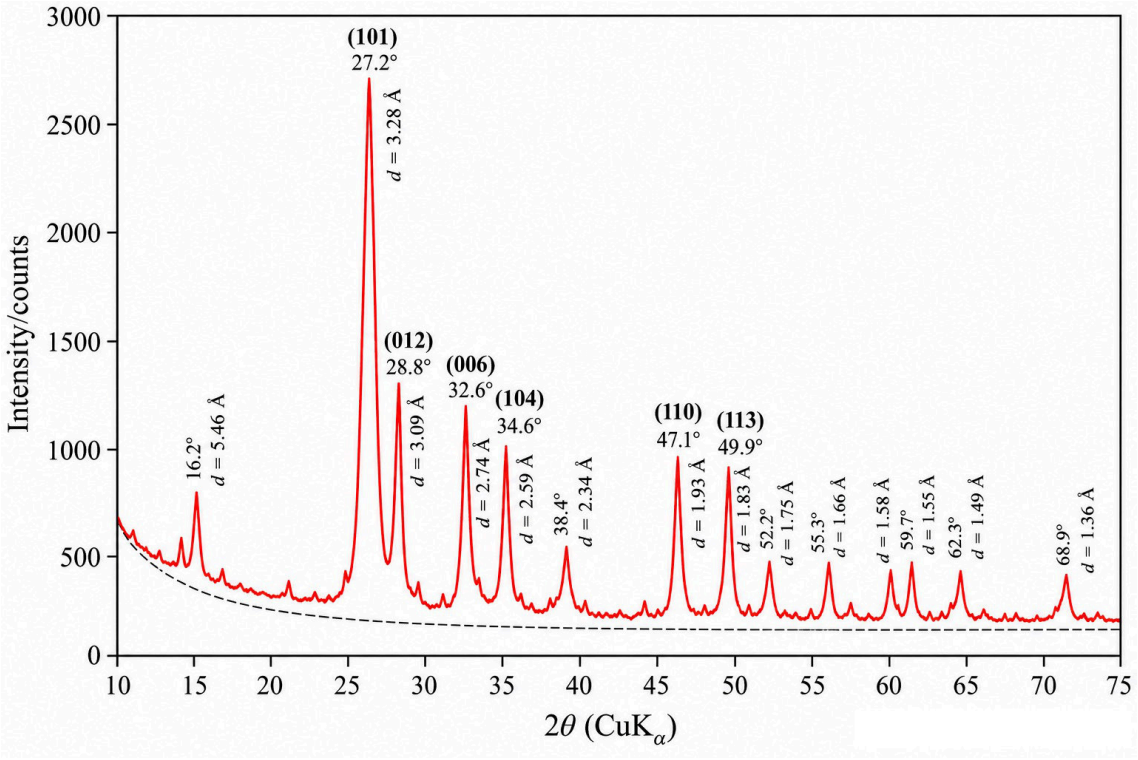


Figure 2. X-ray powder diffraction pattern of the CuSCN precipitate (Cu Kα)

Can guanidine hydrochloride and acrylic acid form guanidine acrylate? The formal metathesis

$$[C(NH_2)_3]Cl + CH_2{=}CHCOOH \rightleftarrows [C(NH_2)_3][CH_2{=}CHCOO] + HCl \qquad (4)$$

is in essence the displacement of hydrochloric acid from its salt by acrylic acid. Its equilibrium constant equals the ratio of the acid dissociation constants, $K = K_a(AA)/K_a(HCl) = 10^{-4.25}/10^{5.9} \approx 7\cdot10^{-11}$, and $\Delta G° = -RT \ln K \approx +58$ kJ/mol. A weak acid cannot displace a strong acid from its salt, and removing water or changing the temperature does not change this conclusion qualitatively. In a mixture of 2 M guanidine hydrochloride and 2 M acrylic acid the acidity is determined by the dissociation of acrylic acid, pH ≈ 1.98, and only 0.53 % of the acid is present as acrylate (Fig. 3, Table 3). Quantitative salt formation requires $pH \geq pK_a + 2 \approx 6.3$, where $\alpha(A^-)$ exceeds 99 %.

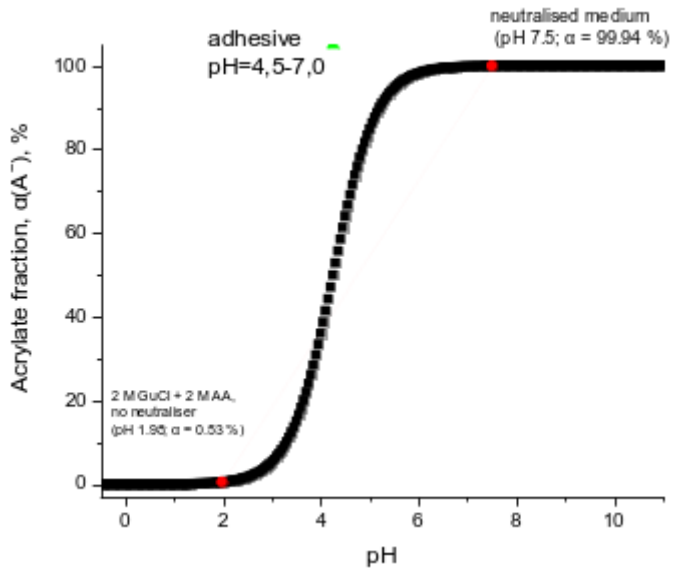


Figure 3. Fraction of acrylate anion as a function of pH (pKa = 4.25, 25 °C) and points corresponding to the synthesis conditions

Table 3. Fraction of acrylate anion under different conditions (25 °C)

Condition	pH	α(A⁻), %	Conclusion
2 M GuCl + 2 M AA, no neutraliser	1.98	0.53	salt < 1 %
Adhesive formulation	4.50	64.0	partly ionised
Neutralised medium	7.50	99.94	quantitative salt formation

The experiment confirms the calculation. Mixing guanidine hydrochloride with acrylic acid at 20–40 °C without a neutraliser gave a viscous, colourless to pale-yellow solution containing small white crystals; above 40 °C the viscosity increased sharply owing to spontaneous radical polymerisation of acrylic acid. The IR spectrum of the product (Fig. 4, Table 4) is dominated by the ν(C=O) band of non-ionised carboxyl groups at 1708.9 cm^{-1} and by the strong C–O/δ(OH) band at about 1160 cm^{-1}; the bands at 2923, 2853 and 1457 cm^{-1} belong to saturated CH_2 groups of a polymer chain. The monomer doublet at 1635/1618 cm^{-1} and the $=CH_2$ wagging band at 985 cm^{-1} are absent, whereas the asymmetric carboxylate band at 1550 cm^{-1} and the guanidinium N–H bands are weak. The main component of the product is therefore a poly(acrylic acid)-like polymer with predominantly non-ionised COOH groups, and guanidinium carboxylate is present only in small amounts – exactly as predicted by the equilibrium (4).

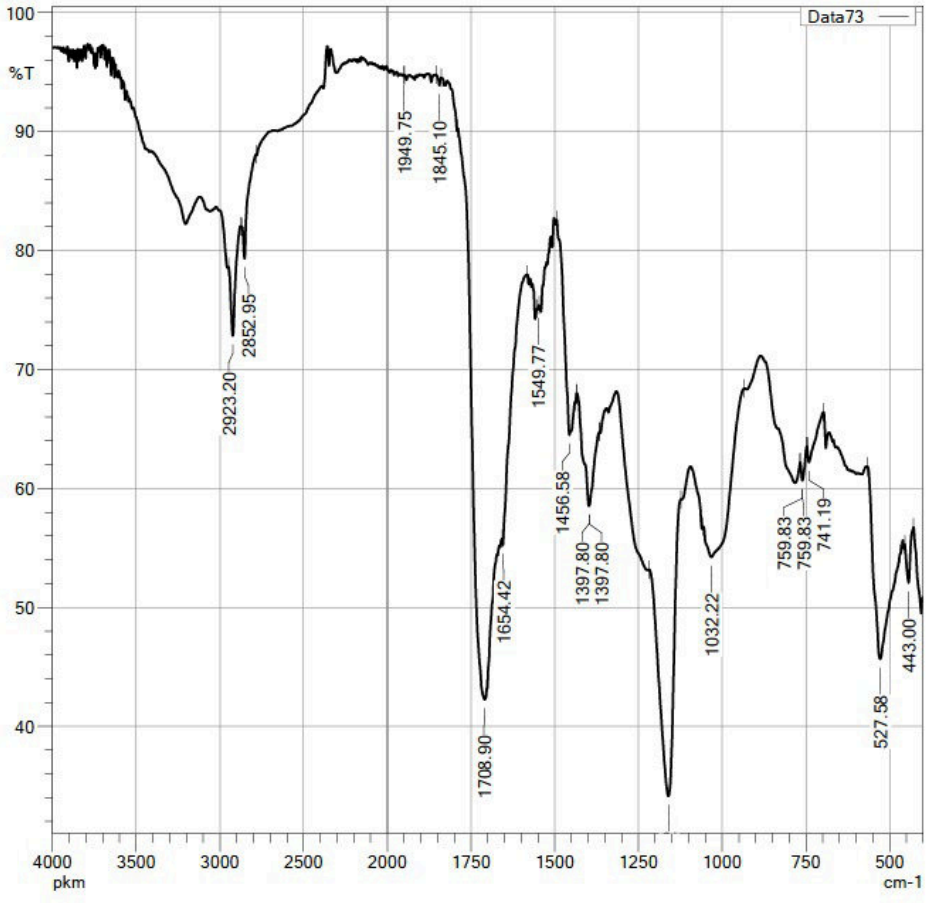


Figure 4. IR spectrum of the product obtained from guanidine hydrochloride and acrylic acid without a neutraliser

Table 4. Comparison of diagnostic IR bands of acrylic acid, poly(acrylic acid), acrylate anion and the product, cm−1

Vibration	Acrylic acid (monomer)	Poly(acrylic acid)	Acrylate (salt)	Product
ν(C=O), COOH	1700–1705	1700–1715	—	1709 (very strong)
$\nu_{as}(COO^-)$	—	—	1550–1570 (strong)	1550 (weak)
ν(C=C)	1635 + 1618	absent	1640–1645	not observed as doublet
$\delta(CH_2)$, chain	—	1450–1455	—	1457
ν(C–O) + δ(OH)	1296, 1240	1240, 1160–1170	—	≈1160
$\omega(=CH_2)$	985, 815–820	absent	985–990	not observed
ν(C–H), saturated	—	2950–2920, 2860–2850	—	2923, 2853

Consequence for the synthesis. The analysis shows that both limitations observed in the experiment – the unfavourable equilibrium and the uncontrolled polymerisation – can be turned to advantage if the order of operations is reversed. Acrylic acid is first polymerised deliberately (ammonium persulfate initiator, 60–80 °C, nitrogen atmosphere), and the poly(acrylic acid) obtained is then neutralised with NaOH in the presence of guanidine hydrochloride:

$$n\ CH_2{=}CHCOOH \rightarrow (–CH_2–CH(COOH)–)_n \quad (5)$$

$$(–CH_2–CH(COOH)–)_n + n\ NaOH + n\ [C(NH_2)_3]Cl \rightarrow$$

$$\rightarrow [–CH_2–CH(COO^- {}^+C(NH_2)_3)–]_n + n\ NaCl + n\ H_2O \qquad (6)$$

Ionisation of the carboxyl groups by NaOH removes the thermodynamic barrier of reaction (4), and the guanidinium cations form with the carboxylate groups ion pairs stabilised by two hydrogen bonds, the bidentate guanidinium–carboxylate motif well known for arginine–carboxylate contacts [8]. Because of the polyelectrolyte effect the apparent pK_a of poly(acrylic acid) increases with the degree of ionisation; the neutralisation should therefore be carried out at pH 7–9, and the degree of neutralisation and of guanidinylation should be controlled by potentiometric titration and nitrogen analysis. For 100 g of guanidine thiocyanate the stoichiometry of reactions (5)–(6) corresponds to 61.0 g of acrylic acid and 33.8 g of NaOH and gives theoretically 111.0 g of guanidinium polyacrylate and 49.5 g of NaCl, which can be removed by dialysis or ultrafiltration. Multipoint ionic binding of guanidinium to a polymer chain is also favourable for limiting leaching of the active component from an adhesive matrix, in line with the general principle of non-leaching guanidine-based materials [3; 5] and with the known strong hydrogen-bond complexation between poly(acrylic acid) and poly(vinyl alcohol) [7].

Conclusion

1. The IR spectrum of waste guanidine thiocyanate (ν(SCN) 2052 cm^{-1}, ν(C=N) 1606 cm^{-1}) confirms its ionic structure; the processing task consists in removing SCN^- while retaining the guanidinium cation.

2. In the presence of metallic copper, thiocyanate is precipitated by copper(II) chloride through synproportionation ($\Delta E° = +1.14$ V, lg K = 19.3) as crystalline CuSCN with a yield of 92 %, without thiocyanogen formation and without acid generation; guanidinium remains in solution as the chloride (80.9 g per 100 g of the waste).

3. The metathesis of guanidine hydrochloride with acrylic acid is thermodynamically forbidden ($K \approx 7 \cdot 10^{-11}$, $\Delta G° \approx +58$ kJ/mol); at pH 1.98 only 0.53 % of acrylic acid is ionised, and the IR spectrum of the product corresponds to partially polymerised acrylic acid with predominantly non-ionised COOH groups.

4. Binding of guanidinium to the acrylic fragment requires ionisation of the carboxyl groups ($pH \geq pKa + 2$); the proposed route – polymerisation of acrylic acid followed by neutralisation of poly(acrylic acid) with NaOH in the presence of guanidine hydrochloride – yields guanidinium polyacrylate and, together with CuSCN, makes the processing of the waste free of nitric acid and acidic effluents.

References

1. Arora N., Dar M.I., Hinderhofer A., Pellet N. et al. Perovskite solar cells with CuSCN hole extraction layers yield stabilized efficiencies greater than 20 % // Science. – 2017. – Vol. 358, No. 6364. – P. 768–771. – DOI: 10.1126/science.aam5655.
2. ASTM E1252-98. Standard Practice for General Techniques for Obtaining Infrared Spectra for Qualitative Analysis. – West Conshohocken: ASTM International, 2021.

3. Cao W., Wei D., Jiang Y., Ye S. et al. Surface chemical bonding with poly(hexamethylene guanidine) for non-leaching antimicrobial poly(ethylene terephthalate) // Journal of Materials Science. – 2019. – Vol. 54, No. 3. – P. 2699–2711. – DOI: 10.1007/s10853-018-2966-0.
4. CRC Handbook of Chemistry and Physics / ed. by J.R. Rumble. – 104th ed. – Boca Raton: CRC Press, 2023.
5. Dong J.J., Muszanska A., Xiang F., Falkenberg R. et al. Contact killing of Gram-positive and Gram-negative bacteria on PDMS provided with immobilized hyperbranched antibacterial coatings // Langmuir. – 2019. – Vol. 35, No. 43. – P. 14108–14116. – DOI: 10.1021/acs.langmuir.9b02549.
6. Haktaniyan M., Bradley M. Polymers showing intrinsic antimicrobial activity // Chemical Society Reviews. – 2022. – Vol. 51, No. 20. – P. 8584–8611. – DOI: 10.1039/d2cs00558a.
7. Li X., Wang Z., Li W., Sun J. Superstrong water-based supramolecular adhesives derived from poly(vinyl alcohol)/poly(acrylic acid) complexes // ACS Materials Letters. – 2021. – Vol. 3, No. 6. – P. 875–882. – DOI: 10.1021/acsmaterialslett.1c00167.
8. Negi I., Jangra R., Gharu A., Trant J.F. et al. Guanidinium–amino acid hydrogen-bonding interactions in protein crystal structures: implications for guanidinium-induced protein denaturation // Physical Chemistry Chemical Physics. – 2023. – Vol. 25, No. 1. – P. 857–869. – DOI: 10.1039/d2cp04943k.
9. Olewnik-Kruszkowska E., Gierszewska M., Jakubowska E., Tarach I. et al. Antibacterial films based on PVA and PVA–chitosan modified with poly(hexamethylene guanidine) // Polymers. – 2093. – Vol. 11, No. 12. – Art. 2093. – DOI: 10.3390/polym11122093.
10. Paz-Villarraga C.A. Castro Í.B., Fillmann G. Biocides in antifouling paint formulations currently registered for use // Environmental Science and Pollution Research. – 2022. – Vol. 29, No. 20. – P. 30090–30101. – DOI: 10.1007/s11356-021-17662-5.
11. Qudratov O., Olimov B.B. Sintez akrilata guanidina na osnove rodanida guanidina i tekhnologiya polucheniya kompozitsionnykh kleyov na ego osnove [Synthesis of guanidine acrylate from guanidine thiocyanate and technology of composite adhesives based on it] // Universum: khimiya i biologiya. – 2026. – No. 7 (145). – DOI: 10.32743/UniChem.2026.145.7.22946. (In Russ.).
12. Shafiei F., Watts M.P., Pajank L., Moreau J.W. The effect of heavy metals on thiocyanate biodegradation by an autotrophic microbial consortium enriched from mine tailings // Applied Microbiology and Biotechnology. – 2021. – Vol. 105, No. 1. – P. 417–427. – DOI: 10.1007/s00253-020-10983-4.
13. Tan J., Zhao Y., Hedrick J.L., Yang Y.Y. Effects of hydrophobicity on antimicrobial activity, selectivity, and functional mechanism of guanidinium-functionalized polymers // Advanced Healthcare Materials. – 2022. – Vol. 11, No. 7. – Art. 2100482. – DOI: 10.1002/adhm.202100482.
14. Trummal A., Lipping L., Kaljurand I., Koppel I.A., Leito I. Acidity of strong acids in water and dimethyl sulfoxide // The Journal of Physical Chemistry A. – 2016. – Vol. 120, No. 20. – P. 3663–3669. – DOI: 10.1021/acs.jpca.6b02253.

15. Turan A., Keyikoglu R., Kobya M., Khataee A. Degradation of thiocyanate by electrochemical oxidation process in coke oven wastewater: role of operative parameters and mechanistic study // Chemosphere. – 2020. – Vol. 255. – Art. 127014. – DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.127014.
16. Wang B., Nam S., Limbu S., Kim J.-S. et al. Properties and applications of copper(I) thiocyanate hole-transport interlayers processed from different solvents // Advanced Electronic Materials. – 2022. – Vol. 8, No. 7. – Art. 2101253. – DOI: 10.1002/aelm.202101253.
17. Wang L., An X., Xiao X., Li N. et al. Treatment of thiocyanate-containing wastewater: a critical review of thiocyanate destruction in industrial effluents // World Journal of Microbiology and Biotechnology. – 2023. – Vol. 39, No. 1. – DOI: 10.1007/s11274-022-03481-4.
18. Wijesekara A., Varagnolo S., Dabera G.D.M.R., Marshall K.P. et al. Assessing the suitability of copper thiocyanate as a hole-transport layer in inverted CsSnI3 perovskite photovoltaics // Scientific Reports. – 2018. – Vol. 8, No. 1. – Art. 15722. – DOI: 10.1038/s41598-018-33987-7.
19. Xu B., Jacobs M.I., Kostko O., Ahmed M. Guanidinium group remains protonated in a strongly basic arginine solution // ChemPhysChem. – 2017. – Vol. 18, No. 12. – P. 1503–1506. – DOI: 10.1002/cphc.201700197.

Received: 23.10.2026
Accepted: 03.11.2026
Published: 28.11.2026

УДК 541.123+546.41

DOI: 10.32743/UniTech.2026.152.11.23688

Polythermal solubility of the $Ca(ClO_3)_2$–$C_{10}H_{14}N_2Na_2O_8$–H_2O system

Siddikov Doniyorbek Ikromjon ugli
Doctoral candidate (basic doctoral program), Senior Researcher
Institute of General and Inorganic Chemistry of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan
Republic of Uzbekistan, Tashkent
E-mail: doniyorsiddiqov852@gmail.com

Olimov Nemat Kayumovich
doctor of Sciences, Professor, Head of Department
Tashkent State Pharmaceutical Institute
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Togasharov Akhat Salimovich
doctor of Sciences, Professor
Head of Laboratory
Institute of General and Inorganic Chemistry of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Политермическая растворимость системы $Ca(ClO_3)_2$–$C_{10}H_{14}N_2Na_2O_8$–H_2O

Сиддиков Дониёрбек Икромжон угли
базовый докторант
ст. науч. сотр., Институт общей и неорганической химии АН РУз
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Олимов Немат Каюмович
д-р наук, проф., заведующий кафедрой
Ташкентский государственный фармацевтический институт
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Тогашаров Ахат Салимович
д-р наук, проф., заведующий лабораторией, Институт общей и неорганической химии АС РУЗ
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Библиографическое описание: Сиддиков Д.И.У., Олимов Н.К., Тогашаров А.С. Политермическая растворимость системы $Ca(ClO_3)_2$–$C_{10}H_{14}N_2Na_2O_8$–H_2O // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23688

For citation: Siddikov D.I.U., Olimov N.K., Togasharov A.S. Polythermal solubility of the Ca(ClO3)2–C10H14N2Na2O8–H2O system // Universum: Technical Sciences : electronic scientific journal. 2026. No. 11(152). Available at: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23688

Abstract

This article presents the results of a solubility study of the ternary water-salt system $Ca(ClO_3)_2$–$C_{10}H_{14}N_2Na_2O_8$–H_2O, which is of scientific and practical interest for the development of chemical compositions with polyfunctional action. The system was studied using a visual polythermal method using data on binary subsystems and internal cross-sections. A polythermal solubility diagram was constructed over a wide temperature range, allowing us to establish patterns of phase equilibria and determine the crystallization regions of individual solid phases. The diagram identifies crystallization regions of ice, calcium chlorate hexahydrate, tetrahydrate, and dihydrate, as well as sodium ethylenediaminetetraacetic acid. A new solid phase with the composition $C_{10}H_{12}CaN_2Na_2O_8$ was identified during the study. Its existence and chemical composition were confirmed by chemical and physicochemical analysis. The obtained experimental data characterize the phase behavior of the system under study, expand our understanding of the interactions of its components in an aqueous environment, and deepen our understanding of crystallization processes. The established patterns of solubility can serve as a scientific basis for further study of the conditions for the formation of stable solid phases and the development of chemical compositions with specified properties, including promising drugs with multifunctional action used in agriculture.

Аннотация

В статье представлены результаты исследования растворимости трехкомпонентной водно-солевой системы $Ca(ClO_3)_2$–$C_{10}H_{14}N_2Na_2O_8$–H_2O, представляющей научный и практический интерес для разработки химических композиций с полифункциональным действием. Изучение системы проводилось визуально-политермическим методом с использованием данных по бинарным подсистемам и внутренним сечениям. В широком температурном диапазоне построена политермическая диаграмма растворимости, позволяющая установить закономерности фазовых равновесий и определить области кристаллизации отдельных твердых фаз. На диаграмме идентифицированы области кристаллизации льда, гексагидрата, тетрагидрата и дигидрата хлората кальция, а также натриевой соли этилендиаминтетрауксусной кислоты. В ходе исследования выявлена новая твердая фаза состава $C_{10}H_{12}CaN_2Na_2O_8$. Ее существование и химический состав подтверждены результатами химического и физико-химического анализа. Полученные экспериментальные данные характеризуют особенности фазового поведения исследуемой системы, расширяют сведения о взаимодействии ее компонентов в водной среде и углубляют понимание процессов кристаллизации. Установленные закономерности растворимости могут служить научной основой для дальнейшего изучения условий образования устойчивых твердых фаз и разработки химических композиций с заданными свойствами, в том числе перспективных препаратов с полифункциональным действием, применяемых в сельском хозяйстве.

Keywords: solubility: water-salt system, polythermal diagram, calcium chlorate, disodium EDTA, phase equilibria, crystal hydrates, solid phase, defoliants.

Ключевые слова: растворимость, водно-солевая система, политермическая диаграмма, хлорат кальция, динатриевая соль ЭДТА, фазовые равновесия, кристаллогидраты, твердая фаза, дефолианты.

Introduction

The cotton plant belongs to the group of plants that shed their leaves both under natural conditions and under the action of chemicals called defoliants [1, 2]. As a result of their use, the plants dry out severely, which has an adverse effect, lowering raw cotton yield, contaminating it, impairing fiber quality, and negatively affecting the oil content of the seeds. Therefore, reducing the “harshness” of defoliants used on cotton and increasing defoliation activity is one of the urgent tasks of the chemicalization of agriculture.

Today, the synthesis of complex-action defoliants with stimulating and physiological activity based on low-toxicity substances, and their effective use, is considered one of the urgent tasks worldwide [3].

Calcium is an essential nutrient for plants. In the form of Ca^{2+}, it performs structural functions in cell walls and membranes, serves as a counter-cation for inorganic and organic anions in the vacuole, and acts as an intracellular messenger that coordinates plant responses to developmental cues and environmental stresses Because calcium is delivered to the shoot through the xylem and cannot be remobilized from older tissues via the phloem, its deficiency most often appears in young expanding tissues and fruits, where transpiration is low [4]. In the research, calcium chlorate was used — the active substance of the calcium chlorate-chloride defoliant, which is inorganic in origin. However, when its per-hectare application rate is exceeded, its harsh effect on plants causes drying of the leaves and burns on the unopened young bolls of the cotton plant. In addition, this preparation does not have polyfunctional action. The use of the sodium salt of ethylenediaminetetraacetic acid, a plant growth stimulant, in the synthesis of new effective defoliants is of great interest. It has biological activity and enhances redox processes, carbohydrate biosynthesis, and the activity of enzymatic processes [5].

In order to provide plants with additional nutrients, adding the sodium salt of ethylenediaminetetraacetic acid to the defoliant composition is of interest from both scientific and practical points of view.

Taking the above into account, in order to substantiate physicochemically the process of obtaining an effective defoliant based on calcium chlorate and the sodium salt of ethylenediaminetetraacetic acid, the solubility of the components in the $Ca(ClO_3)_2$–$C_{10}H_{14}N_2Na_2O_8$–H_2O system over a wide range of temperature and concentration was studied.

Objects and methods of research.

The objects of the study are calcium chlorate and the sodium salt of ethylenediaminetetraacetic acid.

The following methods were used in carrying out the work: the solubility polytherm of the $Ca(ClO_3)_2$–$C_{10}H_{14}N_2Na_2O_8$–H_2O system was studied using the visual-polythermal method [6].

To identify the obtained new phase, chemical and physicochemical methods of analysis were used. In the quantitative chemical analysis of the liquid and solid phases, the calcium content was determined by the volumetric complexometric method [7], and the chlorate-ion content by the volumetric permanganatometric method [8]. The quantitative analysis of carbon, nitrogen, and hydrogen was carried out in accordance with the procedure described in [9].

Thermal analysis was carried out on a Paulik–Paulik–Erdey derivatograph [10]. The analysis was performed at a rate of 10 degrees/min, with 0.1125 g of sample, at galvanometer sensitivities of T-900, TG-200, DTA-1/10, and DTG-1/10. The recording was carried out under atmospheric conditions. A platinum crucible 10 mm in diameter and without a lid was used as the holder. The reference was Al_2O_3.

The X-ray diffraction patterns of the compounds under study were obtained on a Dron-2.0 diffractometer using filtered copper radiation. The voltage was 40 kV, the current was 20 mA, and the counter scanning speed was 2 degrees/min [11].

The IR absorption spectra of the initial components and of the compounds under study were recorded on a Specord IR-75 spectrophotometer in the frequency range of 4000–400 cm^{-1}. The samples were prepared by the methods of pressing with KBr and also grinding in Vaseline oil [12].

Results and discussion

The solubility of the $C_{10}H_{14}N_2Na_2O_8$–H_2O system was studied by us in the temperature range from –2.0 to 60.0 °C. In its polythermal solubility diagram, the crystallization branches of ice and $C_{10}H_{14}N_2Na_2O_8 \cdot 2H_2O$ were distinguished. These branches intersect at a single double point, which represents the coexistence of two solid phases. The double point corresponds to the joint crystallization of ice and the dihydrate crystalline hydrate of the sodium salt of ethylenediaminetetraacetic acid at a temperature of –2.0 °C, at a composition of 11.5 % $C_{10}H_{14}N_2Na_2O_8$ and 88.5 % H_2O (Fig. 1).

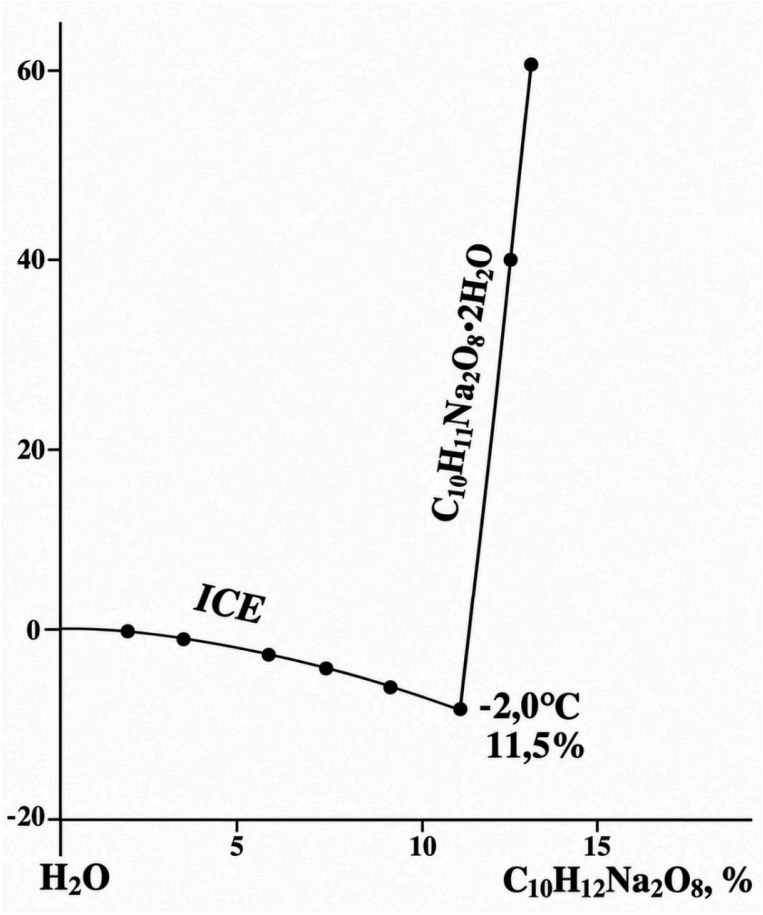


Figure 1. Solubility diagram of the $C_{10}H_{14}N_2Na_2O_8$–H_2O binary system

It was obtained as a result of the interaction of mixtures of calcium chlorate, sodium chlorate and “ch” (pure) grade calcium chloride in a 1:1 molar ratio in an acetone medium, followed by recrystallization of the liquid product isolated from the acetone extract through evaporation and cooling [11].

The calcium chlorate–water binary system, which forms part of the system under study, was studied earlier by the authors [13]. The data obtained by us are consistent with the literature data.

The $Ca(ClO_3)_2$–$C_{10}H_{14}N_2Na_2O_8$–H_2O system was studied by means of six internal sections. Of these, sections I–III were carried out from the sodium salt of ethylenediaminetetraacetic acid–water side toward the $Ca(ClO_3)_2 \cdot 2H_2O$ apex, and sections IV–VI from the calcium chlorate–water side toward the $C_{10}H_{14}N_2Na_2O_8$ pole.

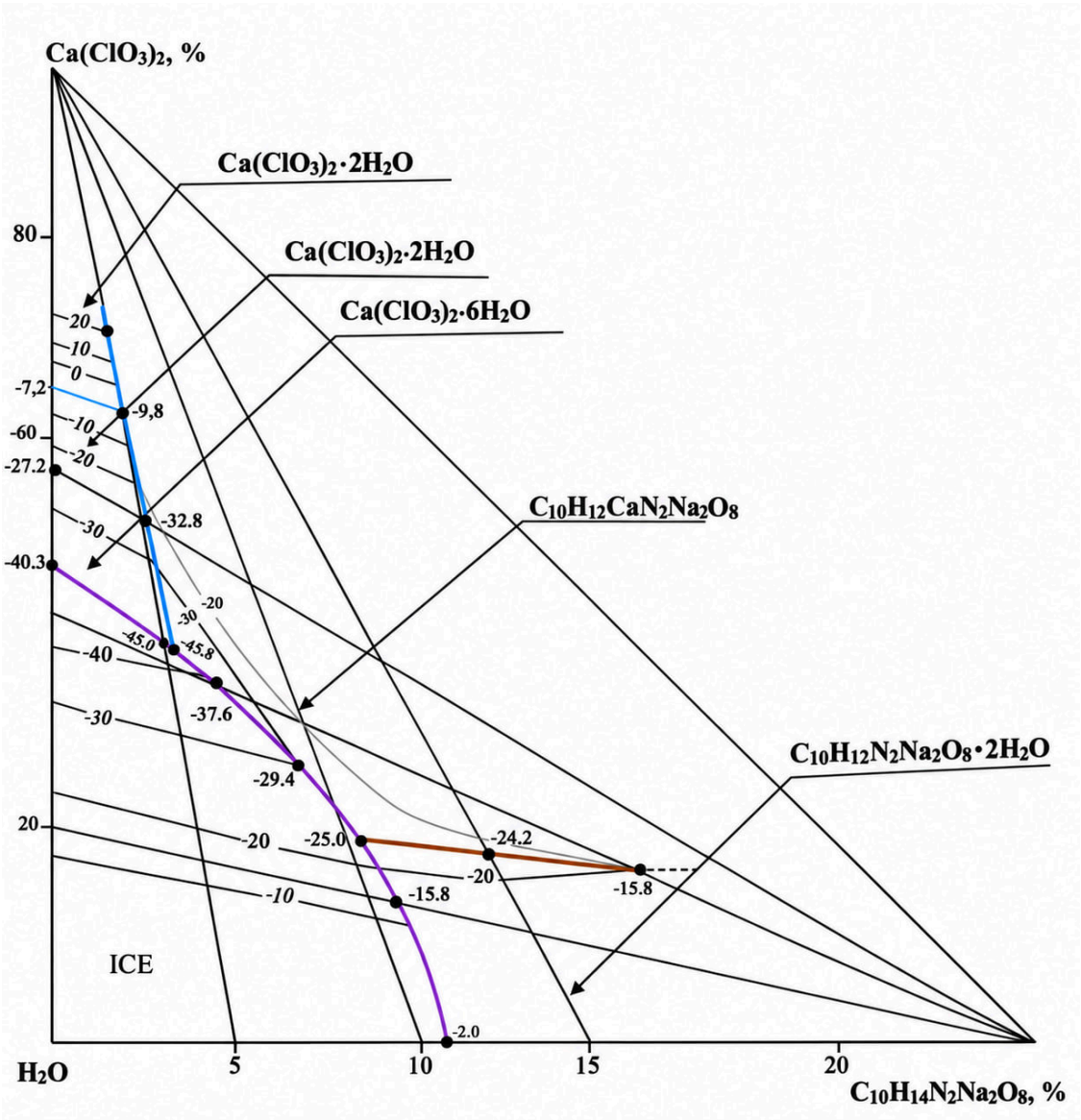


Figure 2. Solubility diagram of the $Ca(ClO_3)_2$–$C_{10}H_{14}N_2Na_2O_8$–H_2O system

Based on the data obtained on the solubility of the binary systems and the six internal sections, a polythermal solubility diagram of the calcium chlorate – sodium salt of ethylenediaminetetraacetic acid – water system in the temperature range from –45.8 to 20.0 °C was constructed**.** The following crystallization fields were delineated in the diagram: ice, the hexa-, tetra- and dihydrate crystalline hydrates of calcium chlorate, the dihydrate crystalline hydrate of the sodium salt of ethylenediaminetetraacetic acid, and the new phase — $C_{10}H_{12}CaN_2Na_2O_8$ (Fig. 2, Table).

Table 1. Double and triple points of the $Ca(ClO_3)_2$– C 10 H 12 Na 2 O 8 – H_2O system

Liquid phase composition, %			Cryst. temp. t, °C	Solid phase
$Ca(ClO_3)_2$	$C_{10}H_{12}Na_2O_8$	H_2O		
46.0	-	54.0	-40.3	Ice + $Ca(ClO_3)_2·6H_2O$
38.0	3.0	59.0	-45.0	Ice + $Ca(ClO_3)_2·6H_2O$
37.5	3.2	59.3	-45.8	Ice + $Ca(ClO_3)_2·6H_2O$+$C_{10}H_{12}N_2O_8CaNa_2$
31.0	5.5	63.5	-37.6	Ice + $C_{10}H_{12}N_2O_8CaNa_2$

Liquid phase composition, %			Cryst. temp. t, °C	Solid phase
$Ca(ClO_3)_2$	$C_{10}H_{12}Na_2O_8$	H_2O		
24.0	7.5	68.5	-29.4	-//-
19.2	8.5	72.6	-25.0	$Ice+C_{10}H_{12}N_2O_8CaNa_2+ C_{10}H_{12}N_2Na_2O_8 \cdot 2H_2O$
12.0	9.7	78.3	-15.8	$Ice+ C_{10}H_{12}N_2Na_2O_8 \cdot \mathbf{2}H_2O$
-	11.2	88.8	-2.0	-//-
19.0	9.7	71.3	-24.2	$C_{10}H_{12}N_2O_8CaNa_2+ C_{10}H_{12}N_2Na_2O_8 \cdot 2H_2O$
19.2	13.0	67.8	-19.8	-//-
55.2	-	44.8	-27.2	$Ca(ClO_3)_2 \cdot 4H_2O+ Ca(ClO_3)_2 \cdot 6H_2O$
49.4	2.5	48.1	-32.8	$Ca(ClO_3)_2 \cdot 4H_2O+Ca(ClO_3)_2 \cdot 6H_2O+C_{10}H_{12}N_2O_8CaNa_2$
61.8	-	38.2	-7.2	$Ca(ClO_3)_2 \cdot 2H_2O+Ca(ClO_3)_2 \cdot 4H_2O$
58.6	2	39.4	-9.8	$Ca(ClO_3)_2 \cdot 2H_2O+Ca(ClO_3)_2 \cdot 4H_2O+ C_{10}H_{12}N_2O_8CaNa_2$
66.0	1.7	32.3	-20	$Ca(ClO_3)_2 \cdot 2H_2O+C_{10}H_{12}N_2O_8CaNa_2$

On the polythermal state diagram of the system, solubility isotherms were drawn at temperatures of -40; -30; -20; -10; 0; 10; 20°C at 10°C intervals. In addition, projections were drawn from the sodium salt of ethylenediaminetetraacetic acid–water side toward the $Ca(ClO_3)_2 \cdot 2H_2O$ apex (Fig. 3a) and from the calcium chlorate–water side toward the $C_{10}H_{14}N_2Na_2O_8$ apex (Fig. 3b).

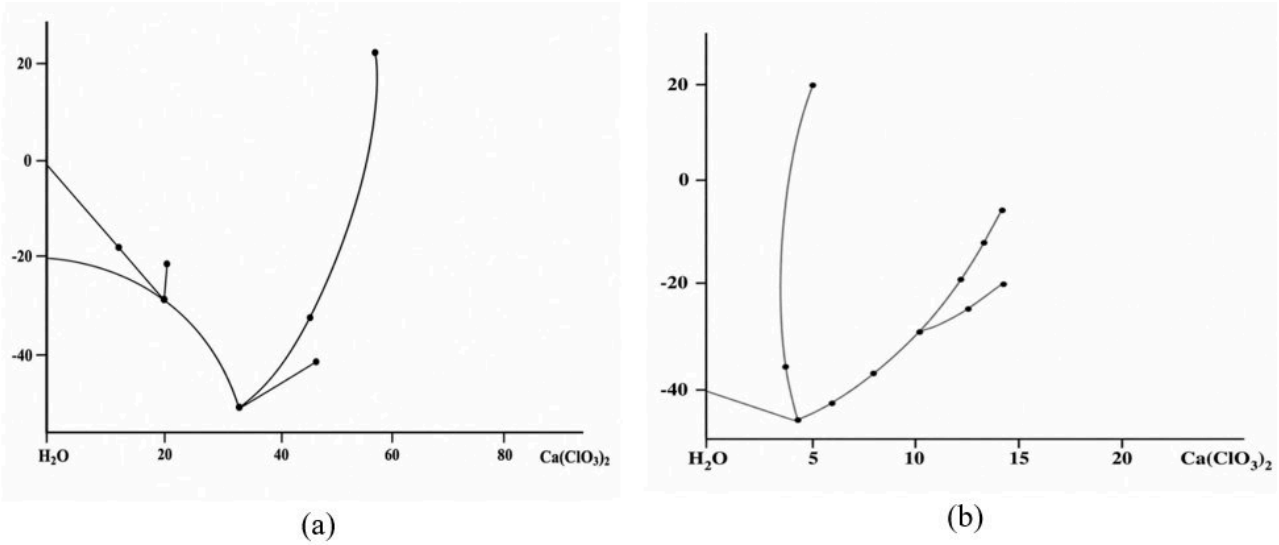


Figure 3. a – projection from the sodium salt of ethylenediaminetetraacetic acid–water side toward the $Ca(ClO_3)_2 \cdot 2H_2O$ apex; b – projection from the calcium chlorate–water side toward the $C_{10}H_{14}N_2Na_2O_8$ apex

Analysis of the polythermal diagram shows that, within the studied concentration and temperature range, the compound $C_{10}H_{12}CaN_2Na_2O_8$ is formed in the system as a new phase. This compound was isolated in the crystalline state and identified by chemical and physicochemical methods of analysis.

Chemical analysis results, found, mass %:

C – 32.3; H – 3.19; CaO – 14.92.

Calculated values for the compound $C_{10}H_{12}CaN_2Na_2O_8$, mass %:

C – 32.0; H – 3.2; CaO – 14.97.

This compound dissolves better in hot water than in cold water, dissolves well in ammonia, and among organic solvents is insoluble in alcohol, acetone, diethyl ether and benzene.

X-ray phase analysis showed that the compound with the composition $C_{10}H_{12}CaN_2Na_2O_8$ is characterized by its own interplanar spacing values. This confirms that it is an individual phase (Fig. 4).

Analysis of the X-ray diffraction pattern of the isolated new phase showed that it does not contain admixtures of the starting products.

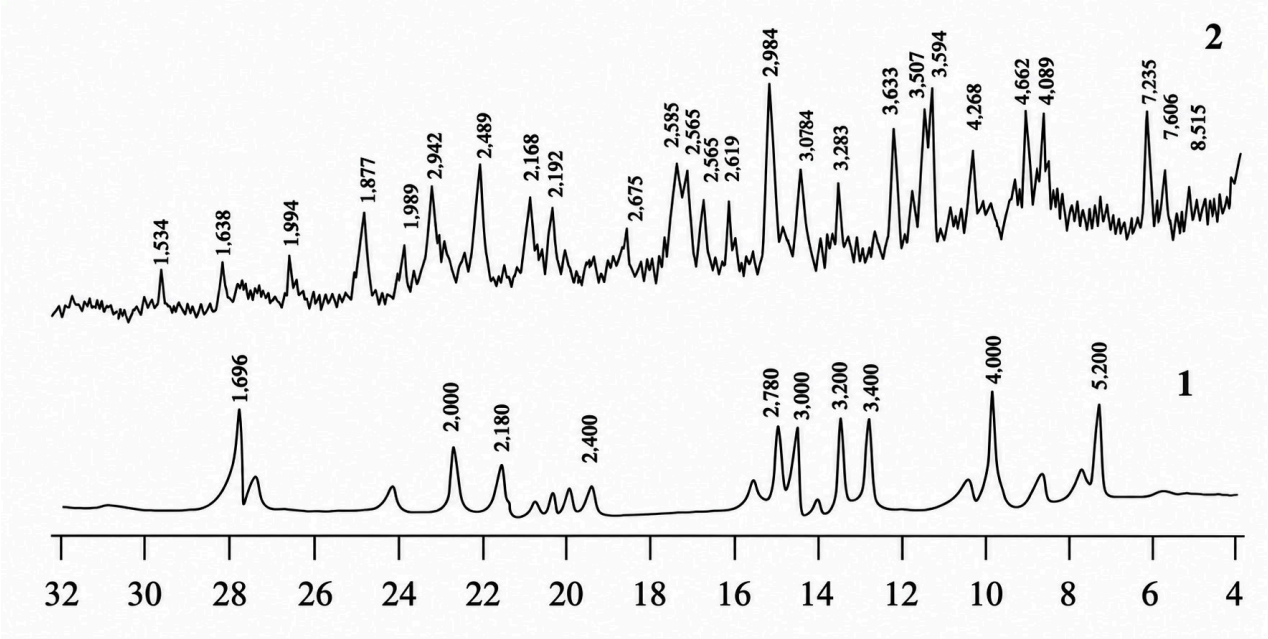


Figure 4. X-ray diffraction patterns of the compounds: 1 – Ca(ClO3)2·2H2O and 2 – $C_{10}H_{12}CaN_2Na_2O_8$

On the heating curve of $C_{10}H_{12}CaN_2Na_2O_8$, six endothermic effects are observed at 138, 188, 370, 702, 848 and 871 °C, and six exothermic effects at 269, 315, 423, 502, 551 and 618 °C. The endothermic effect in the range of 138–188 °C is accompanied by a decrease in the mass of the substance by 0.2–16.8 %, which corresponds to the loss of two water molecules. According to the thermogravimetric curve, the total mass loss in the temperature range of 60–900 °C amounts to 69.78 % (Fig. 5).

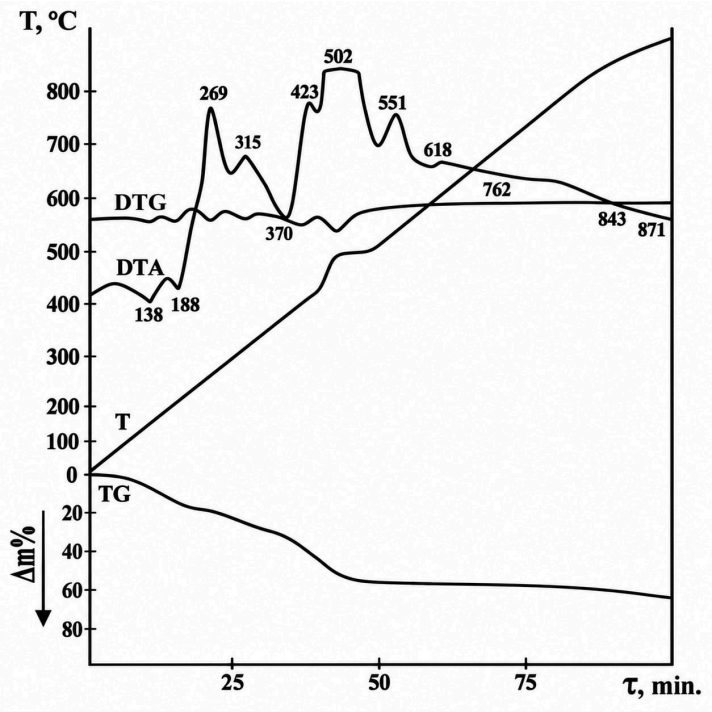


Figure 5. Derivatogram of the compound $C_{10}H_{12}CaN_2Na_2O_8$

For the indicated compounds, the changes in the absorption bands in the IR spectrum are similar to the regularities observed for the compound $C_{10}H_{12}CaN_2Na_2O_8$. The νOH absorption bands are observed in the region of 3434.63 cm^{-1}. They are broadened as a result of the formation of hydrogen bonds with water molecules.

In metal carboxylates, the symmetric stretching vibrations of the COO^- group are observed at 1360–1450 cm^{-1}, and the asymmetric stretching vibrations in the range of 1540–1650 cm^{-1} [12].

According to the results obtained, the symmetric stretching vibrations of the COO^- group were recorded in the absorption bands at 1388–1437 cm^{-1}, and the asymmetric stretching vibrations at 1541–1618 cm^{-1} (Fig. 6).

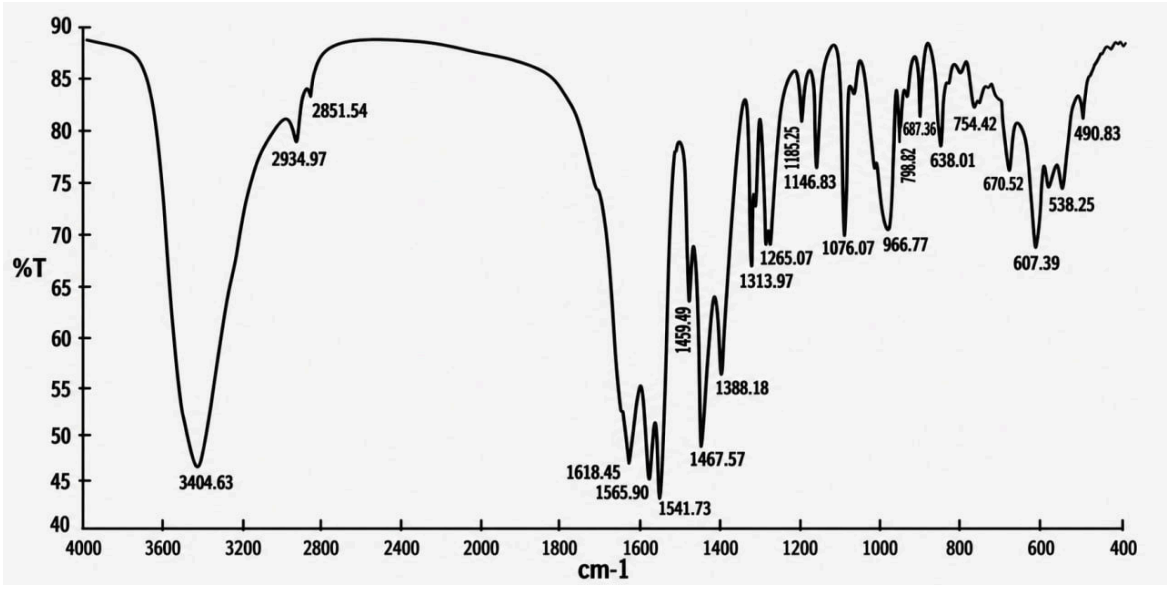


Figure 6. IR spectrum of the compound $C_{10}H_{12}CaN_2Na_2O_8$

Conclusion

Thus, in the studied $Ca(ClO_3)_2$–$C_{10}H_{14}N_2Na_2O_8$–H_2O system, data on the solubility of the components were obtained. The formation of a new phase in the studied system was established; the new phase was isolated, and its existence was confirmed by analysis using chemical and physicochemical methods. These data serve as a scientific basis for the scientific substantiation of the technological process of obtaining a liquid defoliant based on calcium chlorate and the dimonoethanolamine salt of citric acid**.**

References

1. Sh.Sh. Khamdamova, S.T, Tukhtaev S.R. Mirsalimova, M.K. Askarova. «Kompleksnodeystvuyushchie defolianty», – T: Izdatelstvo «Navruz», 2017, P. 186.
2. Kurbanov E., Kuziev R. Sovremennoe sostoyanie plodorodiya pochv Uzbekistana i nekotorye puti ego uluchshenia // Gornyy vestnik Uzbekistana. – 2001. – No. 1. – P. 94–96.
3. Teshaev F., Khaitov B. Effect of defoliants and fertilizers on yield and quality of upland cotton (Gossypium hirsutum L.) // Journal of Cotton Research and Development (CRDA). – 2015. – No. 1. – P. 57–60.
4. White P.J., Broadley M.R. Calcium in plants // Annals of Botany. – 2003. – Vol. 92, No. 4. – P. 487–511. – DOI: 10.1093/aob/mcg164.
5. Miyassarov I.M., Toghasharov A.S., Shukurov J.S., Akhmadzhonova M.Kh., Tukhtaev S. Rheological Properties of Chelate Calcium at Various Concentrations // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology. – 2020. – Vol. 7, No. 9. – P. 14767–14772.
6. Trunin A.S., Petrova D.G. Visual-polythermal method. – Kuibyshev: Kuibyshev Polytechnic Institute, 1977. – 94 P. – Deposited at VINITI, No. 584–78.
7. Schwarzenbach G., Flashka G. Complexonometric titration. – M.: Khimiya, 1970. – 360 P.
8. Gosstandart SSSR. GOST 12257-77. Sodium chlorate. Technical specifications. – Moscow: Izd-vo standartov, 1987. – 19 P.
9. Klimova V.A. Basic micromethod analysis of organic compounds. – M.: Khimiya, 1975. – 224 P.
10. Paulik F., Paulik J., Erdey L. Der Derivatograph: I. Mitteilung. Ein automatisch registrierender Apparat zur gleichzeitigen Ausführung der Differentialthermoanalyse, der thermogravimetrischen und der derivativ-thermogravimetrischen Untersuchungen // Fresenius' Zeitschrift für analytische Chemie. – 1958. – Vol. 160, No. 4. – P. 241–252. – DOI: 10.1007/BF00458472.
11. Turayev K.A., Togasharov A.S., Tukhtaev S. An effective defoliant based on calcium chlorate and sodium salt of monochloroacetic acid // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. – 2022. – Vol. 57, No. 5. – P. 977–983. – DOI: 10.59957/jctm.v57.i5.2022.20.
12. Nakamoto K. Infrared and Raman Spectra of Inorganic and Coordination Compounds. – Moscow: Mir, 1991. – 536 P.10.1134/S0036023621070032. (In Russ.).

13. Bobozhonov Zh.Sh., Shukurov Zh.S., Togasharov A.S., Akhmadzhonova M.Kh. Study of Solubility of $Ca(ClO_3)_2$–[90 % C_2H_5OH + 10 % $C_{10}H_{11}ClN_4$]–H_2O System. Russian Journal of Inorganic Chemistry. – 2021. – Vol. 66. – No. 7. – P. 1031–1035. – DOI: 10.1134/S0036023621070032.

Received: 04.11.2026
Accepted: 12.11.2026
Published: 28.11.2026

УДК 548.73+546.41+661.842

DOI: 10.32743/UniTech.2026.152.11.23705

XRD analysis of calcium fluoride sample obtained from phosphogypsum

Turaxonov Ravshanbek
Doctoral student
Namangan State Technical University
Republic of Uzbekistan, Namangan
E-mail: ravshanbektoraxonov@gmail.com

Sherkuziyev Doniyor
professor
Department of Chemical Engineering, Namangan State Technical University
Republic of Uzbekistan, Namangan
E-mail: doniyor_8184@mail.ru

Рентгенодифракционный анализ образца фторида кальция, полученного из фосфогипса

Турахонов Равшанбек Сатторхон угли
докторант
Наманганский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Наманган

Шеркузиев Дониёр Шермаматович
проф. кафедра химической технологии
Наманганский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Наманган

Abstract

This article presents the results of an X-ray diffraction (XRD) analysis of a solid product obtained during the processing of phosphogypsum with ammonium fluoride. The main objective of the study was to investigate the crystal structure and phase composition of calcium fluoride (CaF_2) formed through the interaction of calcium compounds in phosphogypsum with fluoride ions. The solid product separated by filtration of the reaction mixture was selected as the object of investigation. X-ray diffraction analysis was performed using a Rigaku MiniFlex 300/600 diffractometer with Cu-Kα radiation.

Библиографическое описание: Турахонов Р.С.У., Шеркузиев Д.Ш. Рентгенодифракционный анализ образца фторида кальция, полученного из фосфогипса // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23705

For citation: Turaxonov R., Sherkuziyev D. XRD analysis of calcium fluoride sample obtained from phosphogypsum // Universum: Technical Sciences : electronic scientific journal. 2026. No. 11(152). Available at: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23705

Measurements were carried out over a 2θ range of 3–120°, with a step size of 0.02° and a scanning rate of 2.5°/min. The obtained diffractogram data were processed to identify diffraction maxima and examine their profile characteristics, while phase analysis was conducted using the Whole Powder Pattern Fitting (WPPF) method. A total of 34 diffraction maxima were identified in the diffractogram. In particular, the diffraction peaks at 2θ = 28.28°, 46.94°, 55.60°, and 68.40° were found to correspond to reflections characteristic of the cubic fluorite-type crystal structure of CaF_2. The obtained results demonstrate that X-ray diffraction data can be used to characterize the presence of the CaF_2 phase in the solid product formed during the processing of phosphogypsum with ammonium fluoride.

Аннотация

В статье представлены результаты рентгенодифракционного (XRD) анализа твёрдого продукта, полученного в процессе переработки фосфогипса с использованием фторида аммония. Основной целью исследования являлось изучение кристаллической структуры и фазового состава фторида кальция (CaF_2), образующегося в результате взаимодействия соединений кальция, содержащихся в фосфогипсе, с ионами фтора. Объектом исследования являлся твёрдый продукт, выделенный фильтрованием реакционной смеси. Рентгенодифракционный анализ проводили на дифрактометре Rigaku MiniFlex 300/600 с использованием Cu-Kα-излучения.

Измерения выполняли в диапазоне углов 2θ от 3 до 120° с шагом 0,02° и скоростью сканирования 2,5°/мин. При обработке полученных дифрактограмм определяли дифракционные максимумы, изучали характеристики их профилей, а фазовый анализ проводили методом Whole Powder Pattern Fitting (WPPF). В результате анализа на дифрактограмме было выявлено 34 дифракционных максимума. В частности, установлено, что дифракционные линии при 2θ = 28,28°, 46,94°, 55,60° и 68,40° соответствуют рефлексам, характерным для кристаллической структуры CaF_2 кубического типа флюорита. Полученные результаты позволяют охарактеризовать наличие фазы CaF_2 в твёрдом продукте, образовавшемся при переработке фосфогипса фторидом аммония, на основании данных рентгенодифракционного анализа.

Keywords: phosphogypsum, ammonium fluoride, calcium fluoride, X-ray diffraction analysis, phase composition, crystal structure, fluorite structure, diffractogram, crystal lattice parameters.

Ключевые слова: фосфогипс, фторид аммония, фторид кальция, рентгенодифракционный анализ, фазовый состав, кристаллическая структура, структура флюорита, дифрактограмма, параметры кристаллической решётки.

Introduction

The processing of secondary raw materials and industrial waste generated as a result of industrial production, with the aim of obtaining economically efficient and practically valuable products, is one of the key priorities of modern chemical technology. The recycling of such waste not only reduces the environmental burden caused by industrial activities but also enables the

recovery and reuse of valuable chemical components as secondary resources. From this perspective, the comprehensive processing of phosphogypsum, which is generated in large quantities during the production of phosphate mineral fertilizers, is of particular scientific and practical importance [1,4].

Phosphogypsum is an industrial by-product generated during the processing of phosphate raw materials with sulfuric acid. Its main constituent is calcium sulfate, particularly calcium sulfate dihydrate ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$). The calcium compounds contained in phosphogypsum are considered valuable raw materials for obtaining new products through chemical processing. In particular, the recovery of calcium in the form of a fluoride compound represents one of the alternative technological approaches for producing calcium fluoride CaF_2 [1,5].

Calcium fluoride is one of the important inorganic compounds in the chemical industry and is used in various technological processes as a fluorine-containing raw material. In nature, it occurs as the mineral fluorite and has a cubic crystal structure. The investigation of the crystal structure, phase composition, and crystalline properties of CaF_2 is of great importance for evaluating the chemical and technological aspects of its production process [2,6,7].

X-ray diffraction (XRD) analysis is an important instrumental technique for investigating the composition of the sample. This method provides information about the crystal structure and phase composition of a material by recording diffraction reflections produced by the orderly spatial arrangement of atoms and ions in crystalline substances. Crystalline phases present in the investigated product can be identified by analyzing the angular positions, intensities, and profile characteristics of the diffraction maxima. Furthermore, the Whole Powder Pattern Fitting (WPPF) method, based on mathematical modeling of the entire powder diffraction pattern, enables the determination of crystallographic parameters and the calculation of phase fractions within the selected phase model [8,9,10].

The aim of the study - is to investigate the phase composition and crystal structure of the solid product obtained by processing phosphogypsum with ammonium fluoride using X-ray diffraction analysis, identify the reflections characteristic of the CaF_2 phase, and evaluate its crystallographic parameters using the WPPF method [2,3].

Materials and methods

Research materials: The solid product obtained through the chemical processing of phosphogypsum using ammonium fluoride (NH_4F) was used as the object of this study. The main objective of the process was to investigate the formation of calcium fluoride (CaF_2) as a result of the interaction between calcium sulfate contained in phosphogypsum and fluoride ions[2].

The chemical basis of the process can be expressed by the following reaction equation:

$$CaSO_4 \cdot 2H_2O + 2NH_4F \rightarrow CaF_2 + (NH_4)_2SO_4 + 2H_2O$$

The reaction mixture obtained was subjected to filtration. During this process, the solid phase was retained on the filter and separated. This solid product was selected for the present study. The main objectives were to identify the crystalline phases in its composition and investigate the crystallographic properties of CaF_2.

X-ray Diffraction (XRD) Analysis: X-ray diffraction (XRD) analysis was performed to determine the phase composition and crystal structure of the separated solid product. The measurements were carried out using a Rigaku MiniFlex 300/600 X-ray diffractometer with Cu-Kα radiation.

The X-ray diffraction analysis was performed under the following instrumental conditions: X-ray tube voltage: 40 kV; Tube current: 15 mA; Radiation source: Cu-Kα; $K\alpha_1$ radiation wavelength: 1.540593 Å; $K\alpha_2$ radiation wavelength: 1.544414 Å; Diffraction angle range (2θ): 3–120°; Measurement step size: 0.02°; Scanning speed: 2.5°/min; Measurement geometry: θ/2θ.

The obtained X-ray diffraction data were recorded in the form of a diffractogram. During the processing of the experimental data, the positions, intensities, and profile parameters of the diffraction maxima were analyzed. A profile fitting method based on the Split pseudo-Voigt function was used to evaluate the profiles of the diffraction peaks.

Processing of Diffractogram Data: To conduct a detailed analysis of the research results, the obtained diffractogram data were processed using the Whole Powder Pattern Fitting (WPPF) method. This method enables the evaluation of the presence of crystalline phases through mathematical modeling of the entire diffractogram profile, the determination of their crystal lattice parameters, and the estimation of their calculated phase fractions.

In the WPPF analysis, the cubic fluorite structure of CaF_2 was considered as the primary crystallographic model. Based on the calculation results, the crystal lattice parameters, unit cell volume, and phase fraction values within the selected model were determined.

Furthermore, the diffraction maxima identified in the experimental diffractogram were compared with the theoretical reflections characteristic of the CaF_2 crystal structure. This comparison enabled the assessment of the presence of the calcium fluoride phase in the obtained solid product based on X-ray diffraction data.

Results and discussion

X-ray diffraction analysis results: The calcium fluoride (CaF_2) sample separated by filtration following the treatment of phosphogypsum with ammonium fluoride (NH_4F) was investigated using X-ray diffraction analysis. The analysis was performed using a Rigaku MiniFlex 300/600 diffractometer with copper anode radiation (Cu-Kα). The generator voltage was 40 kV, the tube current was 15 mA, the scanning range was 3–120° in 2θ, the step size was 0.02°, and the scanning speed was 2.50°/min. Measurements were carried out in θ/2θ geometry using an SC-70S detector. The measurement commenced on August 21, 2026, and the report was generated on August 22, 2026.

A total of 34 diffraction maxima (peaks) were identified in the obtained diffractogram. Figure 1 shows the experimental diffraction profile over the entire angular range of 3–120°. The numbers indicated on the graph correspond to the peak numbers listed in Table 1. Since the intensities vary considerably, the vertical axis is presented on a logarithmic scale to allow even the weaker peaks to be clearly observed.

Table 1 presents all 34 identified peaks, including their angular positions (2θ), interplanar spacings (d), peak heights, full widths at half maximum (FWHM), and relative intensities. The relative intensity was calculated as the ratio of each peak height to the height of the most intense peak. This parameter does not represent the mass fraction of a phase.

Table 1. Parameters of the 34 diffraction maxima identified in the X-ray diffractogram of the CaF_2 sample

№	2θ, °		d, Å	Peak height, counts	FWHM, °	Norm. I., % (report)
1	11.620		7.6156	12051.0	0.1080	100.00
2	20.700		4.2910	217.0	0.1050	2.18
3	23.380		3.8049	1372.0	0.1050	12.19
4	23.620		3.7670	19.0	0.2900	0.42
5	26.600		3.3511	23.0	0.1100	0.22
6	28.280		3.1560	145.0	1.1500	12.13
7	29.100		3.0687	406.0	0.1200	4.35
8	31.120		2.8740	15.0	0.0700	0.13
9	33.360		2.6859	19.0	0.0840	0.19
10	34.480		2.6012	11.0	0.0840	0.09
11	35.380		2.5371	65.0	0.0830	0.62
12	40.160		2.2454	5.2	0.0780	0.05
13	40.660		2.2190	23.0	0.1450	0.30
14	46.940		1.9357	114.0	1.3100	11.23
15	47.800		1.9029	84.0	0.1640	1.31
16	48.280		1.8850	12.2	0.7000	0.66
17	49.240		1.8505	48.0	0.1000	0.53
18	50.280		1.8147	34.0	0.0860	0.40
19	51.120		1.7868	37.0	0.1100	0.57
20	55.600		1.6530	32.0	1.8700	3.92
21	59.960		1.5428	4.4	0.1300	0.06
22	60.300		1.5349	10.0	0.0900	0.10
23	61.880		1.4995	3.9	0.1000	0.05
24	63.680		1.4613	19.0	0.1500	0.29
25	68.400		1.3716	15.0	1.6400	1.76
26	70.600		1.3341	12.0	0.1500	0.19
27	74.860		1.2684	14.0	0.1600	0.21
28	75.980		1.2525	9.6	1.9900	1.26
29	77.440		1.2325	10.0	0.2500	0.22
30	86.820		1.1218	8.9	0.0900	0.15
31	87.260		1.1173	11.3	2.8800	2.41
32	93.200		1.0610	7.4	2.2500	1.10
33	101.260		0.9972	7.3	0.2100	0.22
34	110.880		0.9361	24.0	0.2000	0.67

According to the data presented in Table 1, the most intense diffraction maximum was recorded at 11.620°, with a peak height of 12,051 counts, an interplanar spacing of 7.6156 Å, and a full width at half maximum (FWHM) of 0.1085°. The relative intensity of this peak was reported as 100 % in the analysis report. The next most noticeable maxima were recorded at 23.380° (1,372 counts), 29.100° (406 counts), 20.700° (217 counts), and 28.280° (145 counts). The “Norm. I.” column in the report does not fully correspond to the values obtained from the direct ratio of peak heights. Therefore, in this article, peak height (counts) and normalized intensity reported by the software are presented as separate parameters.

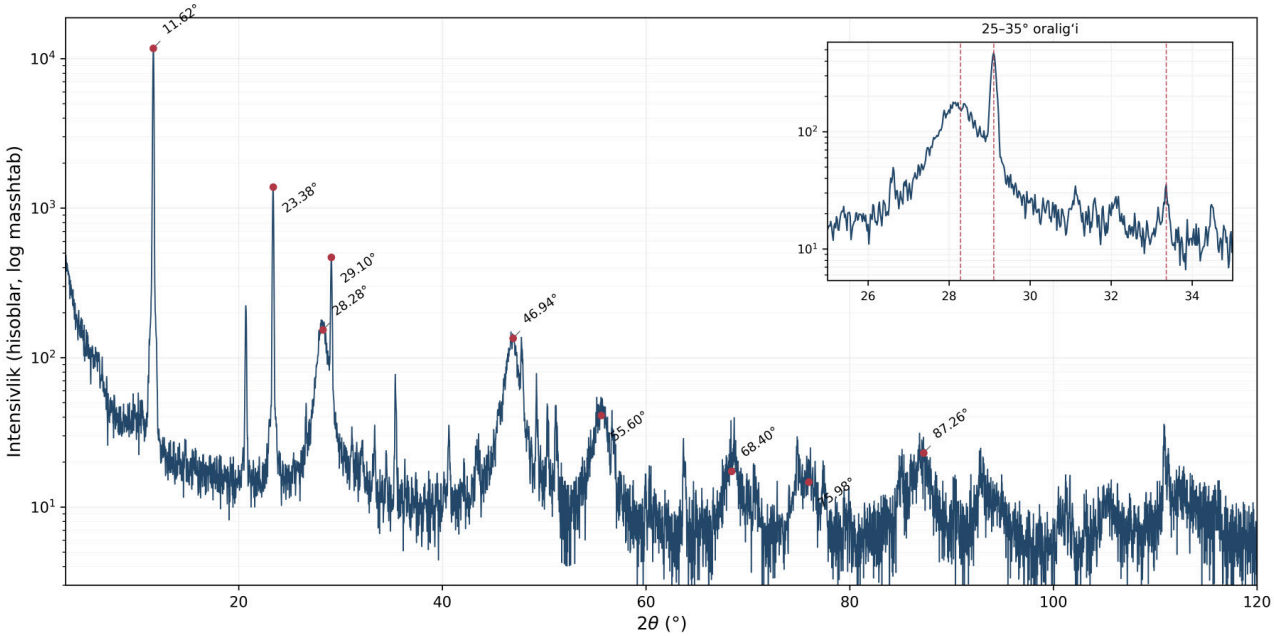


Figure 1. Experimental X-ray diffractogram of the CaF_2 sample over the 3–120° range. The intensity is presented on a logarithmic scale; the inset shows an enlarged view of the 25–35° range

What do these results indicate? The signal observed at 11.62° in the diffractogram is considerably more intense than all the other diffraction maxima. However, this angular position does not correspond to the main reflections characteristic of the cubic fluorite crystal structure of CaF_2. Therefore, it would be incorrect to assign the peak at 11.62° to CaF_2. It may be associated with another crystalline substance remaining in the sample, an additional phase, or an effect related to sample preparation or the sample holder.

The maximum observed at 23.38° also exhibits considerable intensity and does not directly correspond to the main diagnostic reflections of the CaF_2 fluorite model. Although the peak at 29.10° is located close to the CaF_2 reflection at 28.28°, it was recorded as a separate maximum. Therefore, it should be considered an individual additional signal rather than being merged with the CaF_2 reflection at 28.28°. These observations suggest that the investigated CaF_2 sample may contain several crystalline components.

Peak width is also an important parameter for analysis. For example, the FWHM values of the peaks at 28.280°, 46.940°, 55.600°, 68.400°, 75.980°, and 87.260° are 1.150°, 1.310°, 1.870°, 1.640°, 1.990°, and 2.880°, respectively. These maxima exhibit relatively broad profiles. Peak

broadening may be associated with crystallite size, internal microstrain, the overlap of closely spaced reflections, and instrumental broadening. Therefore, no definitive conclusions regarding crystallite size can be drawn solely from these FWHM values.

Comparison of Reflections Corresponding to the CaF_2 Crystal Structure: CaF_2 typically exhibits a cubic fluorite-type crystal structure. Therefore, the peaks in the experimental diffractogram were compared with the theoretical reflection positions of the CaF_2 model provided in the WPPF (Whole Powder Pattern Fitting) report. In this comparison, the theoretical angular position, the nearest experimentally observed maximum, and the angular difference between them were considered for each reflection.

Table 2. Comparison of CaF_2 Reflections and Main Crystallographic Results Based on the WPPF Report

Reflection (hkl) / Parameter	**Theoretical 2θ, °**	**Experimental 2θ, °**	**|Δ2θ|, °**	**Result**
(111)	28.2066	28.280	0.0734	5.4664
(200)	32.6836	33.360	0.6764	5.3718
(220)	46.8955	46.940	0.0445	5.4750
(311)	55.6268	55.600	0.0268	5.4824
(400)	68.4900	68.400	0.0900	5.4864
(331)	75.6460	75.980	0.3340	5.4595
(422)	87.1343	87.260	0.1257	5.4736
Main phase fraction according to WPPF	—	—	—	91.3(17) wt.%
WPPF lattice parameter	—	—	—	a = b = c = 5.47540 Å
Unit cell volume	—	—	—	164.152 Å³
Lattice angles	—	—	—	α = β = γ = 90°
Strain (microstrain)	—	—	—	0.367(8)%
Other phase entries	—	—	—	Fluorite: 0.5(4)%; CaF_2: 1.2(4)%; Ca_2F_4 entry: 6.6(16)%; nanocrystalline CaF_2: 0.5(4)%
Fit statistics	—	—	—	Rwp = 0.00%; Rp = 0.00%; S = 0.0000; χ^2 = 0.0000
WPPF: Fluorite model	—	—	—	0.5(4) wt.%; a = b = c = 5.49116 Å; V = 165.574 Å³
WPPF: Calcium Fluoride (second entry)	—	—	—	1.2(4) wt.%; a = b = 3.69636 Å; c = 2.82092 Å; V = 38.542 Å³
WPPF: Dicalcium Tetrafluoride	—	—	—	6.6(16) wt.%; a = b = c = 6.42788 Å; α = β = γ = 34.433°; V = 75.745 Å³
WPPF: Calcium Difluoride – Nanocrystalline	—	—	—	0.5(4) wt.%; a = b = c = 5.49116 Å; V = 165.574 Å³
Crystallite size (Size)	—	—	—	0.0 Å for all entries (undetermined value)

The first seven rows of Table 2 compare the reflections of the cubic fluorite model of CaF_2 with the corresponding maxima observed experimentally. The subsequent rows summarize the phase fractions and crystallographic parameters reported in the WPPF analysis. Thus, two types of

evidence obtained from the XRD analysis are considered together: the first is the angular correspondence between the experimentally recorded peaks and the CaF_2 model; the second is the phase model results obtained using the WPPF software based on the entire diffraction pattern.

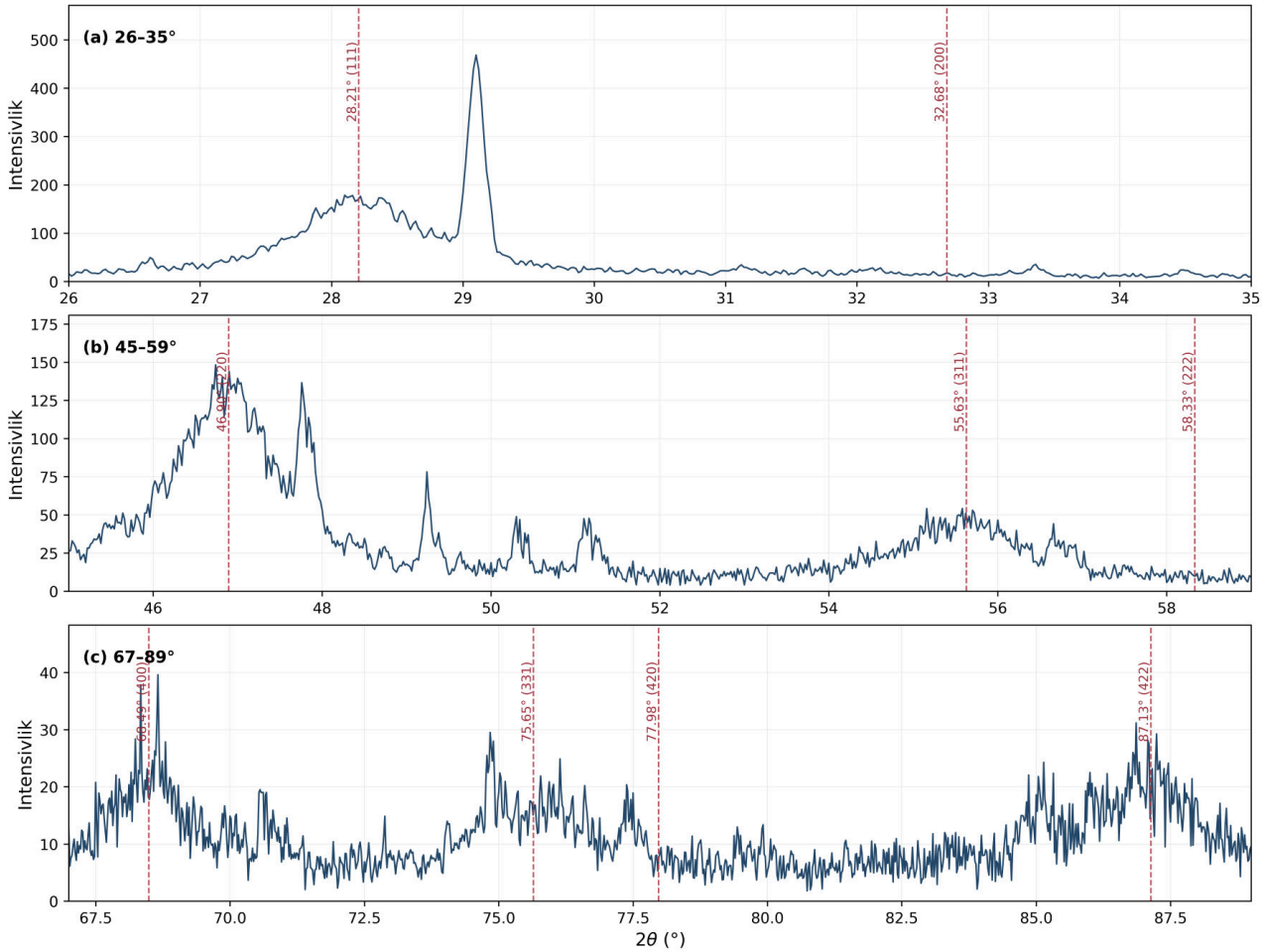


Figure 2. Comparison of the reflections of the cubic fluorite model of CaF_2 with the experimental diffractogram over selected angular ranges. Red dashed lines indicate the theoretical reflection positions of the model, while the blue curve represents the experimentally measured signal

The comparison shows that the experimental peak at 28.280° is very close to the (111) reflection of the CaF_2 model (28.2066°), with a difference of +0.0734°. The peak at 46.940° differs by +0.0445° from the position of the (220) reflection at 46.8955°. The maximum at 55.600° differs by −0.0268° from the position of the (311) reflection at 55.6268°. The peak at 75.980° is located at a difference of +0.334° relative to the (331) reflection, while the peak at 87.260° differs by +0.1257° from the position of the (422) reflection at 87.1343°. These correspondences support the presence of the CaF_2 phase in the sample.

However, not all theoretical reflections are observed experimentally with the same degree of accuracy. For example, the (200) reflection of the model is expected at 32.6836°, whereas the nearest experimental peak is located at 33.360°, corresponding to a difference of 0.6764°. Although the (222) reflection is expected at 58.3319° in the model, no distinct and intense maximum is

observed in this angular region. Thus, while the presence of several reflections corresponding to CaF_2 indicates the formation of this phase, it does not necessarily mean that the entire diffractogram is in complete agreement with that of an ideally pure CaF_2 sample.

When the experimental d-spacing values were used to calculate the cubic lattice parameter according to the relationship $a = d\sqrt{(h^2+k^2+l^2)}$ the values of a for the selected corresponding reflections ranged from 5.3718 to 5.4864 Å. The average value calculated from seven reflections was approximately 5.4593 Å. For the main Calcium Fluoride model, the WPPF report gives a = b = c = 5,47540 Å, α = β = γ = 90° and a unit cell volume of 164.152 Å³. The close agreement between the calculated and model values supports the correspondence with the cubic crystal structure of CaF_2. However, owing to the discrepancies observed for certain reflections, this result cannot be regarded as a substitute for a full Rietveld refinement.

Phase and Crystallographic Results Based on the WPPF Report: According to the WPPF analysis, the main “Calcium Fluoride” entry has a calculated phase fraction of 91.3(17) wt.%, lattice parameters of a = b = c = 5.47540 Å, lattice angles of 90°, a unit cell volume of 164.152 Å³, and a strain (microstrain parameter) of 0.367(8)%. These values were obtained through the selected mathematical and crystallographic model. Therefore, the value of 91.3(17)% should be interpreted as the phase fraction calculated within the framework of the WPPF model, rather than as the chemical purity of the CaF_2 sample or the reaction yield.

Additionally, the WPPF report records the following phase entries: “Fluorite” — 0.5(4) wt.%, the second “Calcium Fluoride” entry — 1.2(4) wt.%, “Dicalcium Tetrafluoride” — 6.6(16) wt.%, and “Calcium Difluoride – Nanocrystalline” — 0.5(4) wt.%. Some of these entries may correspond to synonyms or alternative structural models of CaF_2. In particular, “Calcium Fluoride” and “Fluorite” both chemically represent CaF_2. Therefore, these entries should not be interpreted as five independent chemical components. The crystallographic files in the database and the calculation settings need to be examined to clarify these results.

The crystallite size is reported as 0.0 Å for all phases in the WPPF analysis. This is not a physically meaningful crystallite size; rather, it may indicate that this parameter was not calculated or could not be determined. The fitting statistics in the report are given as Rwp = 0.00 %, Rp = 0.00 %, S = 0.0000, and $\chi^2 = 0.0000$. Considering that a real experimental diffractogram contains background signals and measurement noise, these zero values indicate that the quality of the fit requires independent verification. Therefore, the value of 91.3(17) wt.% is reported as an important software-derived result; however, it should not be presented as a finally validated quantitative composition.

Overall, the experimental maxima observed at approximately 28.280°, 46.940°, 55.600°, 68.400°, 75.980°, and 87.260° correspond to the cubic fluorite structure of CaF_2. The WPPF report also identifies “Calcium Fluoride” as the main phase and gives its lattice parameter as 5.47540 Å. These results support the formation of CaF_2 as a result of phosphogypsum processing with ammonium fluoride. At the same time, the intense additional maxima at 11.620° and 23.380° indicate the possible presence of other crystalline phases in the sample. Thus, the analysis confirms the presence of the CaF_2 phase but is insufficient to declare the sample to be absolutely pure CaF_2.

Conclusion

The CaF_2 sample separated by filtration following the processing of phosphogypsum with ammonium fluoride (NH_4F) was investigated using X-ray diffraction (XRD) analysis. A total of 34 diffraction maxima were identified in the obtained diffractogram.

The maxima observed in the experimental diffractogram at 28.280°, 46.940°, 55.600°, 68.400°, 75.980°, and 87.260° showed close agreement with the reflections corresponding to the cubic fluorite crystal structure of CaF_2. These results confirm the presence of the crystalline CaF_2 phase in the sample.

The intense maxima observed in the diffractogram at 11.620° and 23.380° did not correspond to the main fluorite reflections of CaF_2. The distinct maximum at 29.100° also differed from the CaF_2 reflection at 28.280°. This indicates the possible presence of other crystalline phases in the sample, in addition to CaF_2, or measurement-related effects.

The WPPF analysis indicated a phase fraction of 91.3(17) wt.% for the main “Calcium Fluoride” model. Overall, the X-ray diffraction analysis demonstrated the formation of the crystalline CaF_2 phase through the processing of phosphogypsum with NH_4F. To assess the phase purity of the product more accurately, further phase analysis and comparison with a reference sample are recommended.

CaF_2 is primarily used in industry as a flux (an additive that facilitates the melting process) in metallurgical operations, as well as a raw material for the production of hydrofluoric acid and other fluorine-containing compounds. In addition, calcium fluoride with an appropriate level of purity and particle-size distribution is also used in the glass, ceramics, and enamel manufacturing industries.

References

1. Ennaciri Y., Bettach M., El Alaoui-Belghiti H. Recovery of nano-calcium fluoride and ammonium bisulphate from phosphogypsum waste // International Journal of Environmental Studies. – 2020. – Vol. 77, No. 2. – P. 297–306. – DOI: 10.1080/00207233.2020.1737426.
2. To‘raxonov R.S. & Sherquziyev D.S. FOSFOGIPS CHIQINDISI ASOSIDA (NH4)2SO4 HAMDA CaF2 OLISH JARAYONINI TADQIQ QILISH VA ULARNING FAZAVIY TARKIBINI O‘RGANISH. Development Of Science, 12(1), P. 263–272 [Электронный ресурс]. – 2025. – P. 263–272. – URL: http://www.devos.uz/files/2783.pdf.
3. Guan Q., Wang Z., Zhou F., Yu W., Yin Z., Zhang Z., Chi R., Zhou J. The impurity removal and comprehensive utilization of phosphogypsum: a review // Materials. – 2067. – Vol. 17, No. 9. – Art. 2067. – DOI: 10.3390/ma17092067.
4. Kholmurodov J.E., Namazov Sh.S., Seytnazarov A.R., Nomozov Sh.Y., Qosimov D.M. Thermal analysis of conversion products derived from phosphogypsum and natural gypsum // Chemical Science International Journal. – 2026. – Vol. 35, No. 1. – P. 1–12. – DOI: 10.9734/CSJI/2026/v35i11012.
5. Mamataliyev A.A., Bozorov I.I., Ruziyeva U.M. Technology for obtaining NPS-fertilizers based on ammonium nitrate melt, Kyzylkum phosphorite, and phosphogypsum // Multidisciplinary Journal: Fundamental Research Scientific Journal. – 2026. – Vol. 2, No. 3. – P. 38–47.

6. Namazov Sh.S., Radjabov R., Kholmurodov J.E., Karshiev B.N., Khudayberdiyev J.K. Scientific and technological foundations for washing-based purification of phosphogypsum // Qo‘qon DPI. Ilmiy xabarlar jurnali. – 2026. – Vol. 8, No. 6. – P. 104–114. – DOI: 10.70728/a.series.tab.v08.i06.015.
7. Ospanov T.A., Reymov A.M., Kurbaniyazov R., Bisenbaev J.M. Production of organo-mineral fertilizing ameliorants based on phosphogypsum, Central Kyzylkum phosphorites and biohumus // Kimyo va kimyo texnologiyasi. – 2026. – No. 2.
8. DOI: [Электронный ресурс]. – URL: https://doi.org/10.70189/1992–9498.1718.
9. Sultonov B.E., Nodirov A.A., Xolmatov D.S. Research of the composition of phosphogypsum produced during the extracting of phosphoric acid from ordinary phosphorite powder by the clinker method // Chemical Science International Journal. – 2023. – Vol. 32, No. 2. – P. 51–58.
10. DOI: [Электронный ресурс]. – URL: https://doi.org/10.9734/CSJI/2023/v32i2844.
11. Zhou L. Preparation of calcium fluoride using phosphogypsum by orthogonal experiment // Open Chemistry. – 2018. – Vol. 16, No. 1. – P. 864–868. – DOI: 10.1515/chem-2018-0093.
12. Zhou Z., Lu Y., Zhan W., Guo L., Du Y., Zhang T.C., Du D. Four stage precipitation for efficient recovery of N, P, and F elements from leachate of waste phosphogypsum // Minerals Engineering. – 2022. – Vol. 182. – Art. 107420. – DOI: 10.1016/j.mineng.2022.107420.

Received: 16.09.2026
Accepted: 31.10.2026
Published: 28.11.2026

УДК 546.24+661.6

Physicochemical justification of the calcium chlorate production process using a secondary product from caustic soda production

Umirov Farkhod
doctor of Technical Sciences, Professor
of the Department of Chemical Technology
Navoi State University of Mining and Technologies
ave. Galaba Shokh
Republic of Uzbekistan, Navoi
E-mail: umirov3@yandex.com

Majidov Hayotjon
Doctoral student of the Department of Chemica technology Navoi State University of Mining and Technologies ave. Galaba Shokh
Republic of Uzbekistan, Navoi
E-mail: majidovhayot532@gmail.com

Vakhabov Rustam
Head of the Department of Innovation and Localization, Standardization and Standards Management, JSC "Navoiyazot"
Republic of Uzbekistan, Navoi
E-mail: rustamvakhobov6@gmail.com

Физико-химическое обоснование процесса производства хлората кальция на основе вторичного продукта производства каустической соды

Умиров Фарҳод Эргашевич
д-р техн. наук, проф.
кафедры Химическая технология Навоийский государственный горно-технологический университет, Республики Узбекистан
г. Навои

Маджидов Хаётжон Бахтиёр угли
базовый докторант
кафедры «Химическая технология» Навоийский государственный горно-технологический университет, Республики Узбекистан
г. Навои

Библиографическое описание: Умиров Ф.Э., Маджидов Х.Б.У., Вахобов Р.У. Физико-химическое обоснование процесса производства хлората кальция на основе вторичного продукта производства каустической соды // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23681

For citation: Umirov F., Majidov H., Vakhabov R. Physicochemical justification of the calcium chlorate production process using a secondary product from caustic soda production // Universum: Technical Sciences : electronic scientific journal. 2026. No. 11(152). Available at: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23681

Вахобов Рустам Уктамович
начальник отдела инноваций и локализации стандартизации и управления стандартами, АО «Навоиазот»
Республика Узбекистан, г. Навои

Abstract

The chemical composition of a secondary technogenic product-sludge generated in the caustic soda production unit of JSC “Navoiyazot”-was investigated to assess the feasibility of its further processing and utilization as a calcium-containing raw material. Particular attention was paid to developing the scientific and technological basis for the production of calcium chloride-chlorate through the processing of this secondary product. A comprehensive study of the sludge composition was carried out, including the determination of silicon-containing components as well as iron, aluminum, and calcium compounds that may affect the course of chemical transformations and the quality of the resulting product.

To provide a physicochemical basis for the proposed process, the conversion of calcium chloride with sodium hypochlorite was investigated. The effects of key technological parameters, particularly temperature and the pH of the reaction medium, on the direction and extent of chemical transformations were established. Particular attention was given to the conditions of calcium chlorate formation and to changes in the composition of the reaction system depending on the selected temperature and acid–base conditions. The conditions favorable for the formation of a chlorate-containing product based on calcium compounds were determined.

The experimental results confirmed the formation of calcium chlorate in the investigated system and made it possible to establish a relationship between the composition of the initial raw material, process parameters, and characteristics of the final product. Based on the obtained results, technological recommendations were formulated for the processing of calcium-containing sludge generated during caustic soda production and its utilization in the production of calcium chloride-chlorate.

Аннотация

В работе исследован химический состав вторичного техногенного продукта - шлама, образующегося в отделении производства каустической соды АО «Навоиазот», с целью оценки возможности его дальнейшей переработки и использования в качестве кальцийсодержащего сырья. Основное внимание уделено разработке научных и технологических основ получения хлорид-хлората кальция с вовлечением данного вторичного продукта в переработку. Проведено комплексное исследование состава шлама, включающее определение содержания кремнийсодержащих компонентов, а также соединений железа, алюминия и кальция, способных оказывать влияние на протекание химических превращений и качество получаемого продукта. Для физико-химического обоснования предлагаемого процесса исследованы закономерности конверсии хлорида кальция гипохлоритом натрия. Установлено влияние основных технологических параметров, в частности температуры и значения pH реакционной среды, на направление и глубину протекания химических превращений. Особое внимание уделено условиям образования хлората кальция и изменению состава реакционной системы в зависимости от выбранного

температурного и кислотно-основного режима. Определены условия, способствующие протеканию процесса образования хлоратсодержащего продукта на основе кальциевых соединений.

Полученные экспериментальные данные подтвердили образование хлората кальция в исследуемой системе и позволили установить взаимосвязь между составом исходного сырья, параметрами процесса и характеристиками конечного продукта. На основании результатов исследований сформулированы технологические рекомендации по переработке кальцийсодержащего шлама производства каустической соды и его использованию при получении хлорид-хлората кальция.

Keywords: caustic soda sludge, calcium chloride, calcium chlorate, sodium hypochlorite, conversion, molar ratio, temperature.

Ключевые слова: шлам каустической соды, хлорид кальция, хлорат кальция, гипохлорит натрия, конверсия, молярное соотношение, температура.

Introduction

Secondary technogenic sources of calcium compounds include distillation liquids from the soda industry, precipitates from caustic soda production, wastes from phosphate fertilizer production, and other industrial residues. In these secondary sources, calcium and magnesium are commonly present in the form of carbonates, hydroxides, chlorides, or sulfates [1,2].

The high content of calcium compounds in the residue generated during the caustic soda production process makes it a promising secondary raw material for recycling and the production of calcium-containing products. Treatment of the residue with mineral acids enables the production of a solution predominantly containing calcium chloride, which can subsequently be used as a precursor for calcium chlorate synthesis [3,4].

The aim of this study is to substantiate the processes for recovering liquid calcium chloride from caustic soda production waste and to develop value-added products based on the resulting calcium chloride solution. The choice of this direction is governed by the following considerations. The sludge of brine purification at the caustic soda production stage is characterized by a high content of calcium compounds (CaO up to 33.4 wt. %), which makes it a promising secondary calcium-containing raw material. Acid treatment of such a sludge allows the calcium to be transferred into solution in the form of calcium chloride, which is a convenient precursor for further conversion into oxygen-containing chlorine compounds. The presence of a sodium hypochlorite stream at the same production site makes it possible to carry out the conversion in a closed technological cycle without additional reagent preparation. At the same time, the behavior of the $Ca(ClO_3)_2$–$CaCl_2$–H_2O system, which determines the choice of concentration and temperature conditions for obtaining a concentrated liquid defoliant, remains insufficiently studied. These prerequisites determine the formulation of the research problem: from the characterization of the secondary product to the physicochemical justification of the conditions for its processing into a calcium chloride-chlorate product.

The polyvinyl chloride, caustic soda, and methanol production complex at “Navoiyazot” JSC was commissioned on December 28, 2019. The complex has production capacities of 100,000 tonnes of polyvinyl chloride (PVC), 75,000 tonnes of 32 % caustic soda, 11,250 tonnes of 31 % hydrochloric acid, and 300,000 tonnes of methanol per ear. Highly purified sodium chloride brine is used as the feedstock for caustic soda production. During the preparation and purification of the brine, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Fe^{3+}, and Al^{3+} ions, as well as SiO_2 and other mineral components, must be removed from the solution. Precipitation of these components, followed by solid–liquid separation, results in the formation of process sludge. The secondary products generated at the complex are mainly formed as two types of process sludge [5,6]. One of these is a saline precipitate formed by the precipitation of calcium and magnesium compounds during the chemical purification of sodium chloride brine. The caustic soda production capacity of Workshop 910 is 75.000 tonnes per ear, and the average generation rate of this process sludge is 0.75–0.85 tonnes per hour. Due to its relatively high content of calcium and magnesium compounds, this secondary product can be considered a promising source of secondary mineral raw material. Its processing enables the recovery of valuable components and their subsequent utilization for the production of new industrial products. Therefore, the recycling of this sludge represents a promising approach to improving resource efficiency and advancing waste-free and environmentally sustainable technologies[7-10].

Materials and Methods

The research object was the secondary product, namely the precipitate (sludge), generated in the caustic soda production section of «Navoiyazot» JSC.

The study focused on determining the chemical and mineralogical composition of the sludge samples, investigating the dissolution of their principal components using acid treatment, and studying the processes of their selective separation.

X-ray diffraction (XRD). The phase composition of the precipitate was determined by XRD on a diffractometer using Cu Kα radiation (λ = 1.5406 Å) in the 2θ range of 5–90° with a step of 0.02° and a spectrum accumulation time sufficient to obtain reflections with intensities of 4000–6000 counts. The sample was pre-dried at 105 °C to constant mass and ground to a particle size of less than 100 μm. The identification of crystalline phases was carried out by comparing the obtained values of 2θ, interplanar spacings d, and relative intensities with the reference data of the ICDD (PDF-2) and COD databases. The relative proportions of the identified phases were estimated from the integral intensities of the characteristic reflections using the reference intensity ratios (RIR) method.

X-ray fluorescence (XRF). The elemental (oxide) composition of the precipitate was determined on a Shimadzu RF-6000 X-ray fluorescence spectrometer. The sample was air-dried, dried at 105 °C for 2 h to constant mass, and sieved through a 100 μm sieve; the prepared powder was pressed into a tablet. The mass fractions of oxides (SiO_2, CaO, MgO, Al_2O_3, Fe_2O_3, K_2O, TiO_2, MnO) and of the chloride ion were determined using standard calibration curves constructed from certified reference materials. The measurement results were normalized to 100 %.

Scanning electron microscopy with energy-dispersive X-ray microanalysis (SEM-EDS). The morphology and local elemental composition of the solid residues were studied on a scanning electron microscope equipped with an EDS attachment (Oxford Instruments) at an accelerating

voltage of 15–20 kV. The elemental composition was determined in several points and in the mapping mode; the data were used to assess the distribution of Ca, Mg, Si, Al, Fe, Cl, and O in the samples before and after acid treatment.

Thermal analysis. The thermal behavior of the precipitate was studied by combined TG/DTA on a derivatograph in the temperature range of 20–1000 °C at a heating rate of 10 °C/min in air; the data were used to identify carbonate and hydrate phases and to evaluate the content of physically bound and crystallization water.

Acid leaching and selective separation. The leaching of the precipitate was carried out at a solid-to-liquid mass ratio of 1:4 at 60 °C for 60 min with mechanical stirring at 400–500 rpm; hydrochloric acid solutions with concentrations of 20, 25, and 32 % were used as leaching agents. The suspension was separated by vacuum filtration. Iron(III) and aluminum ions were separated from the filtrate by gradual addition of a 16 % NH_4OH solution to pH 8.3, followed by filtration of the resulting hydroxide precipitate. The density of the filtrate was determined with a hydrometer, and the pH was monitored with a laboratory pH meter with a glass electrode.

Synthesis and analysis of the target product. The conversion of calcium chloride with sodium hypochlorite and sodium chlorate was carried out in a thermostated reactor with a mechanical stirrer at 50–80 °C, pH 10–11, and a stirring speed of 300–500 rpm. The pH of the medium was maintained by adding an alkali solution and controlled with a pH meter. The content of active chlorine and chlorate in the solutions was determined by iodometric titration; the content of calcium and magnesium ions was determined by complexometric titration with Trilon B; the chloride ion content was determined by mercurimetric (argentometric) titration. The composition of the liquid and solid phases was additionally controlled by XRF and XRD.

Physicochemical analysis of the $Ca(ClO_3)_2$–$CaCl_2$–H_2O system. The solubility diagram was studied by the visual-polythermal method. The compositions of the liquid phases in equilibrium with the solid phases were determined by the «suspension» method: the investigated mixtures were thermostatted at a given temperature until equilibrium was reached (with periodic stirring), samples of the liquid phase were taken, and their composition was determined by titration and by the refractive index (dry residue). The temperatures of the phase transitions (eutectic and peritectic points) were recorded from the change in the nature of the temperature–time curve and from the appearance/disappearance of the solid phase. The equilibrium states were studied in the temperature range from −50 to 100 °C; the isothermal solubility curves were constructed at 10 °C intervals. The obtained data were compared with literature data on the binary systems $CaCl_2$–H_2O and $Ca(ClO_3)_2$–H_2O.

Calculations. Stoichiometric calculations of the reagent consumption were performed on the basis of the reactions of acid dissolution of the oxide components of the sludge, the disproportionation of sodium hypochlorite, and the conversion of calcium chloride with sodium chlorate, taking into account the excess of the precipitant required to achieve the specified pH. The comparative evaluation of the results was carried out by comparing the calculated and experimentally determined compositions of the products, as well as by comparing the obtained solubility data with the literature data.

Results and Discussion

The crystalline phases present in the secondary product generated in the caustic soda production section of JSC «Navoiyazot», i.e., the precipitate sample, were investigated by X-ray diffraction (XRD) phase analysis. The qualitative and quantitative elemental composition of the sample was determined using X-ray fluorescence (XRF) analysis performed on a Shimadzu RF-6000 instrument.

The X-ray diffractogram of the precipitate sample was recorded using Cu Kα radiation (λ = 1.5406 Å) over the 2θ range of 5–90°. The most intense reflections were observed at approximately 2θ ≈ 22.5°, 26.6°, and 29.4°, with intensities ranging from 4,000 to 6,000 counts. The 2θ positions, interplanar spacings (d), and relative intensities of the reflections were compared with crystallographic data from the ICDD (International Centre for Diffraction Data) and COD (Crystallography Open Database) databases to identify the phase composition of the sample. The X-ray diffractogram of the precipitate sample and the relative proportions of the identified phases are presented in Fig. 1.

Phase identification revealed the presence of the following major crystalline phases in the sample: silicon dioxide (quartz, SiO_2); calcium carbonate (calcite, $CaCO_3$); calcium magnesium carbonate (dolomite, $CaMg(CO_3)_2$); magnesium-aluminum and aluminum-magnesium oxides (spinel-type $(Mg,Al)_3O_4$); magnesium phosphate ($Mg_3(PO_4)_2$); calcium silicates ($Ca_3(Si_3O_9)$, $Ca(Al_2Si_2O_8)$); magnesium-aluminum silicate ($Mg_2(Al_4Si_5O_{18})$); and calcium-iron silicate ($Ca_3Fe_2(SiO_4)_3$). The relative proportions of the identified phases are presented in Table 1 and in the inset of Fig. 1.

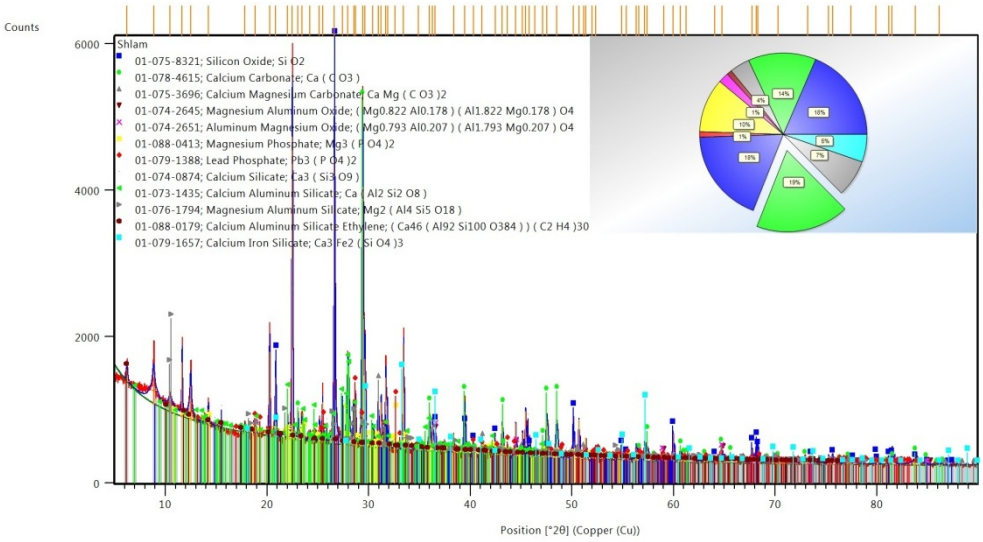


Figure 1. X-ray diffraction analysis results and relative phase proportions of the precipitate sample

Table 1. Phases identified by X-ray diffraction analysis of the precipitate sample and their relative proportions

№	Phase (Mineral)	Chemical Formula	Proportion, %
1.	Silicon dioxide (quartz)	SiO_2	18
2.	Calcium carbonate (calcite)	$CaCO_2$	19
3.	Calcium–magnesium carbonate	$CaMg(CO_3)_2$	14

№	Phase (Mineral)	Chemical Formula	Proportion, %
4.	Magnesium–aluminum oxide	$(Mg,Al)_3O_4$	18
5.	Aluminum–magnesium oxide	$(Al,Mg)_3O_4$	1
6.	Magnesium phosphate	$Mg_3(PO_4)_2$	10
7.	Lead phosphate	$Pb_3(PO_4)_2$	1
8.	Calcium silicate	$Ca_3(Si_3O_9)$	18
9.	Calcium–iron silicate	$Ca_3Fe_2(SiO_4)_3$	5
10.	Other silicates	—	residue

The obtained results indicate that the precipitate is multiphase in nature, predominantly characterized by a carbonate-silicate composition. The precipitate contains compounds of calcium, magnesium, silicon, aluminum, iron, and phosphorus, which is in good agreement with the presentation data provided by «Navoiyazot» JSC, indicating the presence of Ca, Mg, Cl, Fe, Al, and Si in the precipitate.

To quantitatively determine the elemental (oxide) composition of the precipitate, X-ray fluorescence (XRF) analysis was performed. The XRF spectrum of the precipitate sample is shown in Fig. 2. The analysis was carried out using a Shimadzu RF-6000 X-ray fluorescence spectrometer. The sample was air-dried and then dried at 105 °C for 2 h to constant mass, followed by sieving through a 100 μm sieve. XRF analysis enabled the determination of the mass fractions of the major oxides and elements present in the sludge (Table 2).

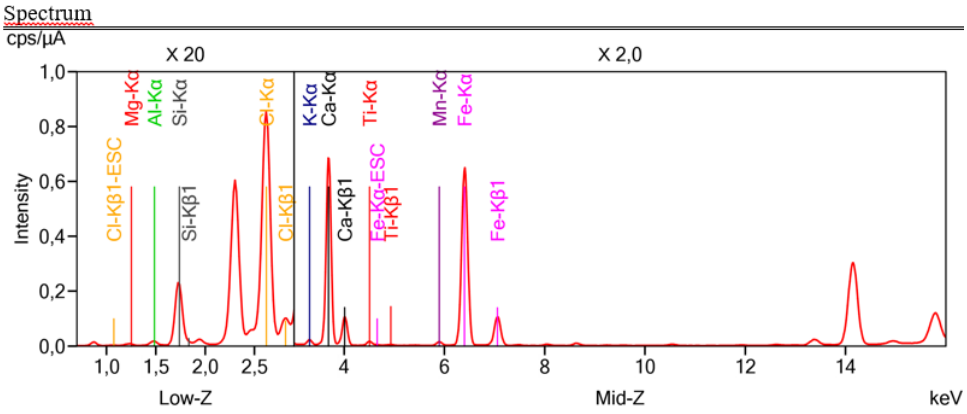


Figure 2. X-ray fluorescence (XRF) analysis of the precipitate sample

Table 2. Chemical composition of the precipitate sample according to X-ray fluorescence (XRF) analysis

№	Component	Amount, wt. %
1.	Silicon dioxide	36.3
2.	Calcium oxide	33.4
3.	Magnesium oxide	10.5
4.	Aluminum oxide	9.05
5.	Chloride ion	5.18
6.	Iron oxide	3.91
7.	Potassium oxide	1.03
8.	Titanium oxide	0.589

№	Component	Amount, wt. %
9.	Manganese oxide (MnO)	0.041

The precipitate sample used in this study was collected from Workshop 910 of the caustic soda production section at «Navoiyazot» JSC. According to the XRF analysis, the precipitate contains SiO_2 (36.3 %), CaO (33.4 %), MgO (10.5 %), Al_2O_3 (9.05 %), Cl^- (5.18 %), Fe_2O_3 (3.91 %), K_2O (1.03 %), TiO_2 (0.589 %) and MnO (0.041 %).

The selective leaching process was carried out at a precipitate-to-hydrochloric acid solution mass ratio of 1:4, at 60 °C for 60 min, with mechanical stirring at 400–500 rpm. Hydrochloric acid solutions with concentrations of 20 %, 25 %, and 32 % were used as leaching agents. During the process, the oxides present in the sludge, including CaO, MgO, Al_2O_3, Fe_2O_3, K_2O, TiO_2, and MnO, reacted with hydrochloric acid and were converted into the corresponding chloride compounds. Silicon dioxide (SiO_2), which is practically insoluble in hydrochloric acid under the experimental conditions, remained in the solid residue. The resulting suspension was separated by vacuum filtration, yielding a filtrate containing dissolved chloride compounds and a SiO_2-rich solid residue. The filtrate contained $CaCl_2$, $MgCl_2$, $AlCl_3$, $FeCl_3$, KCl, and other chloride compounds. To selectively separate iron(III) and aluminum ions from the solution, a 16 % ammonium hydroxide (NH_4OH) solution was gradually added to the filtrate.

The morphology and elemental composition of the solid residue after treatment with 30 % HCl are shown in Fig. 3. According to the EDS data, silicon remains predominantly in the solid phase, whereas calcium, magnesium, aluminum, and iron pass into the filtrate.

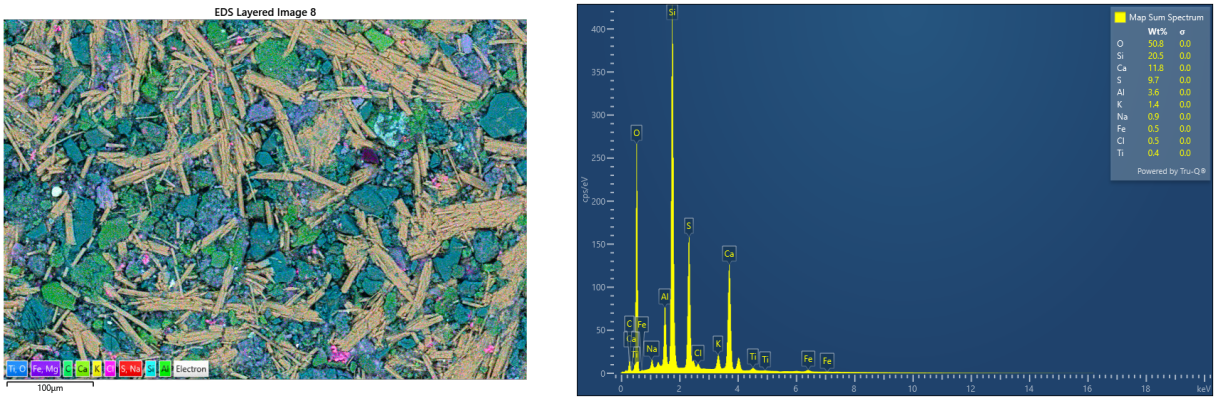


Figure 3. SEM analysis of the composition of the precipitate separated after treatment with 30 % HCl solution

The precipitate formed was separated by filtration. The solid residue retained on the filter consisted of iron(III) hydroxide and aluminum hydroxide. The clear filtrate obtained was a 38 % solution consisting predominantly of calcium chloride, with a density of ρ = 1.40 g/cm³ and a pH of 8.3. The resulting solution was clear and transparent, with no visible mechanical impurities or suspended precipitate.

The calcium chloride-chlorate product with defoliant properties was obtained from the calcium chloride solution in two stages.

The first stage — disproportionation of sodium hypochlorite to chlorate. A 16–18 % sodium hypochlorite (NaClO) solution was added to the 38 % calcium chloride solution at a molar ratio of $CaCl_2$ = 1:6. The resulting mixture was heated to 60–80 °C and maintained at pH = 10 under alkaline conditions for 70 min with mechanical stirring at 400–500 rpm. At this stage, sodium hypochlorite was converted to sodium chlorate according to the following disproportionation reaction:

$$3NaClO \rightarrow NaClO_3 + 2NaCl \ (60–80\ °C)$$

Second stage — conversion of calcium chloride with sodium chlorate. In the sodium chlorate-containing medium obtained in the first stage, the conversion process with calcium chloride was carried out at a temperature of 50–70 °C, in an alkaline medium at pH = 11, with a stirring speed of 300–500 rpm for 30 minutes:

$$CaCl_2 + 2NaClO_3 \rightarrow Ca(ClO_3)_2 + 2NaCl$$

At the end of the process, a mixed-composition solution containing calcium chloride and calcium chlorate — $CaCl_2 \cdot Ca(ClO_3)_2$ — with defoliant properties was obtained.

To provide a physicochemical justification for the production process of a concentrated calcium chlorate defoliant with a high active ingredient content, it is necessary to understand the behavior of the components in the $Ca(ClO_3)_2$–$CaCl_2$–H_2O system over a wide range of temperatures and concentrations. Therefore, this system was studied using the visual-polythermal method. The polythermal solubility diagram of the $Ca(ClO_3)_2$–$CaCl_2$–H_2O system, constructed from the experimental data, is shown in Fig. 4.

In the polythermal solubility diagram of the $Ca(ClO_3)_2$–$CaCl_2$–H_2O system, changes in the composition of the liquid phase in equilibrium with various calcium chlorate and calcium chloride hydrates were observed with changes in temperature.

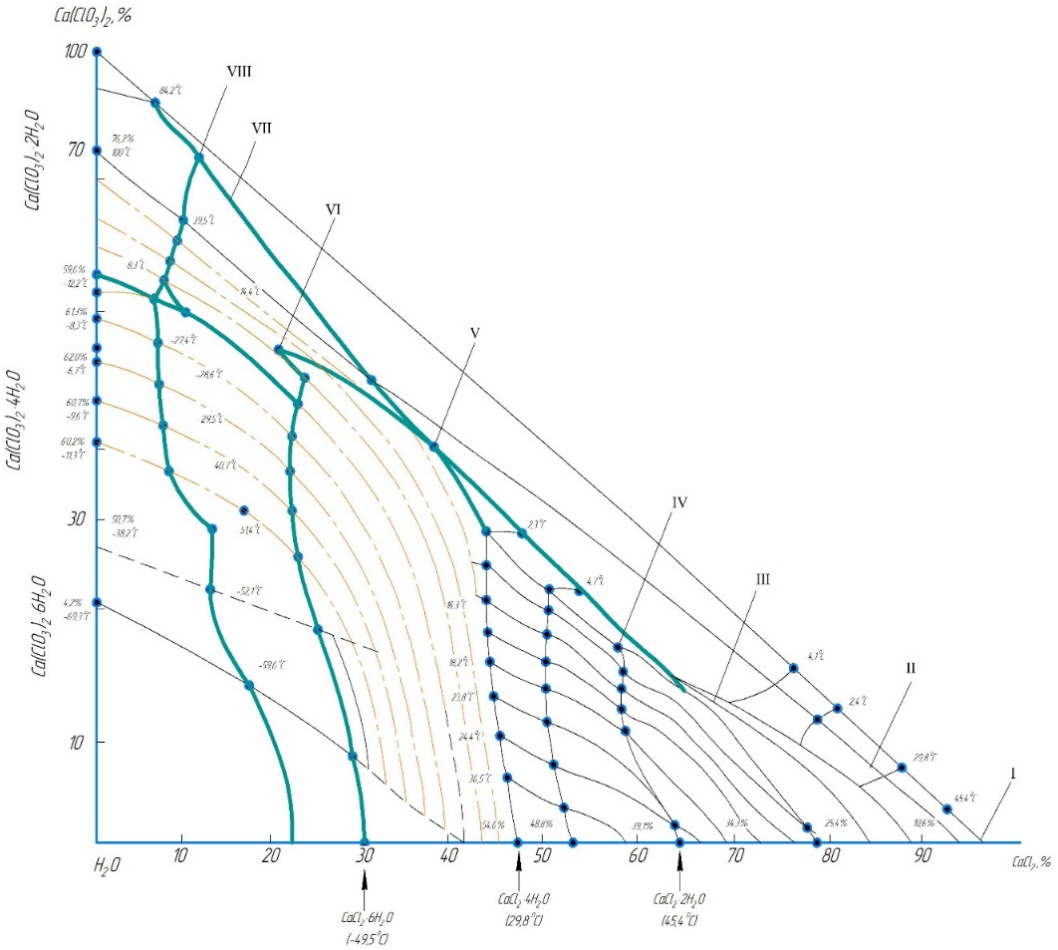


Figure 4. Polythermal solubility diagram of the $Ca(ClO_3)_2$–$CaCl_2$–H_2O system

The solubility curve of calcium chlorate in water shows the liquidus lines corresponding to ice and different hydration states of calcium chlorate. In the calcium chlorate–water system, ice formation continues to the calcium chlorate concentration of 45.8 % at −40.7 °C (eutectic point). From this point, calcium chlorate hexahydrate begins to crystallize and remains stable up to −27.4 °C. The temperature range from −27.4 °C to −6.7 °C corresponds to the crystallization region of calcium chlorate tetrahydroate. Crystallization of calcium chloride dihydrate begins at −6.7 °C at a calcium chlorate concentration of 62 %.

Table 3. Description of the binary and ternary points identified in the Ca(ClO 3) 2 –CaCl 2 –H 2 O system

Liquid phase composition, %			t_{cp}, ^{0}C	Solid phase
$Ca(ClO_3)_2$	$CaCl_2$	H_2O		
-	30.7	69.3	-49.5	Ice+ $CaCl_2 \cdot 6H_2O$
13.1	26.2	60.7	-51.4	Ice + $CaCl_2 \cdot 6H_2O$
15.3	24.9	59.8	-52.1	Ice + $CaCl_2 \cdot 6H_2O$
34.2	15.4	50.4	-59.6	Ice + $CaCl_2 \cdot 6H_2O$
44.2	3.1	52.7	-69.3	Ice + $Ca(ClO_3)_2 \cdot 6H_2O$+$CaCl_2 \cdot 6H_2O$
46.2	-	53.8	-40.7	Ice +$Ca(ClO_3)_2 \cdot 6H_2O$
50.7	2.1	47.2	-38.2	$Ca(ClO_3)_2 \cdot 6H_2O$+ $Ca(ClO_3)_2 \cdot 6H_2O$

Liquid phase composition, %			$t_{ср}$, ^{0}C	Solid phase
$Ca(ClO_3)_2$	$CaCl_2$	H_2O		
54.1	1.2	44.7	-29.5	$Ca(ClO_3)_2 \cdot 6H_2O + Ca(ClO_3)_2 \cdot 4H_2O + CaCl_2 \cdot H_2O$
55.1	-	44.9	-27.4	$Ca(ClO_3)_2 \cdot 6H_2O + Ca(ClO_3)_2 \cdot 4H_2O$
59.6	0.9	39.5	-12.2	$Ca(ClO_3)_2 \cdot 4H_2O + CaCl_2 \cdot 6H_2O$
60.2	1.1	38.7	-11.3	$Ca(ClO_3)_2 \cdot 4H_2O + CaCl_2 \cdot 6H_2O + CaCl_2 \cdot 4H_2O$
60.7	1.0	38.3	-9.6	$Ca(ClO_3)_2 \cdot 4H_2O + CaCl_2 \cdot 4H_2O + CaCl_2 \cdot 2H_2O$
61.3	0.9	37.8	-8.3	$Ca(ClO_3)_2 \cdot 4H_2O + Ca(ClO_3)_2 \cdot 2H_2O + CaCl_2 \cdot 2H_2O$
62.0	-	38.0	-6.7	$Ca(ClO_3)_2 \cdot 4H_2O + Ca(ClO_3)_2 \cdot 2H_2O$
68.4	2.7	28.9	39.4	$Ca(ClO_3)_2 \cdot 2H_2O + CaCl_2 \cdot 2H_2O$
71.8	4.9	23.3	84.2	$Ca(ClO_3)_2 \cdot 2H_2O + CaCl_2 \cdot 2H_2O$
76.2	5.7	18.1	100	$Ca(ClO_3)_2 \cdot 2H_2O + CaCl_2 \cdot 2H_2O$
57.4	4.9	37.7	-8.7	$CaCl_2 \cdot 6H_2O + CaCl_2 \cdot 4H_2O$
45.7	16.4	37.9	2.3	$CaCl_2 \cdot 6H_2O + CaCl_2 \cdot 4H_2O$
43.5	20.7	35.9	4.7	$CaCl_2 \cdot 6H_2O + CaCl_2 \cdot 4H_2O$
27.4	31.2	41.4	14.4	$CaCl_2 \cdot 6H_2O + CaCl_2 \cdot 4H_2O$
22.3	33.1	44.6	18.2	$CaCl_2 \cdot 6H_2O + CaCl_2 \cdot 4H_2O$
11.7	42.1	46.2	23.8	$CaCl_2 \cdot 6H_2O + CaCl_2 \cdot 4H_2O$
-	50.2	49.8	29.8	$CaCl_2 \cdot 6H_2O + CaCl_2 \cdot 4H_2O$
54.6	8.6	36.8	-4.1	$CaCl_2 \cdot 4H_2O + CaCl_2 \cdot 2H_2O$
48.8	15.5	35.7	2.4	$CaCl_2 \cdot 4H_2O + CaCl_2 \cdot 2H_2O$
39.1	25.3	35.6	11.6	$CaCl_2 \cdot 4H_2O + CaCl_2 \cdot 2H_2O$
34.3	29.5	36.2	16.3	$CaCl_2 \cdot 4H_2O + CaCl_2 \cdot 2H_2O$
25.4	36.7	37.9	24.4	$CaCl_2 \cdot 4H_2O + CaCl_2 \cdot 2H_2O$
10.6	47.6	41.8	36.5	$CaCl_2 \cdot 4H_2O + CaCl_2 \cdot 2H_2O$
-	56.7	43.3	45.4	$CaCl_2 \cdot 4H_2O + CaCl_2 \cdot 2H_2O$

The calcium chloride–water binary system was studied over the temperature range from the freezing point to 100 °C. Within the investigated temperature range, the solubility curve of calcium chloride in water consists of four crystallization branches of solid phases: ice, calcium chloride hexahydrate, calcium chloride tetrahydroate, and calcium chloride dihydrate.

The data obtained regarding the location of the eutectic points and the regions of existence of calcium chlorate and calcium chloride hydrates are consistent with the literature data.

The polythermal solubility diagram of the studied system consists of seven crystallization fields of solid phases: ice, $Ca(ClO_3)_2 \cdot 6H_2O$, $Ca(ClO_3)_2 \cdot 4H_2O$, $Ca(ClO_3)_2 \cdot 2H_2O$, $CaCl_2 \cdot 6H_2O$, $CaCl_2 \cdot 4H_2O$, and $CaCl_2 \cdot 2H_2O$. The crystallization fields converge at five invariant triple points corresponding to the simultaneous coexistence of three solid phases. The characteristics of the binary and ternary invariant points are presented in Table 3. The polythermal phase diagram shows isothermal solubility curves at 10 °C intervals over the temperature range from −50 °C to 100 °C.

The presented data indicate that, in the studied $CaCl_2$–$Ca(ClO_3)_2$–H_2O system, no new chemical compounds or solid solutions based on the initial components are formed over the temperature range from −50 to 100 °C. The system is characterized by crystallization fields of solid phases, including ice, $CaCl_2 \cdot 6H_2O$, $CaCl_2 \cdot 4H_2O$, $CaCl_2 \cdot 2H_2O$, $Ca(ClO_3)_2 \cdot 6H_2O$, $Ca(ClO_3)_2 \cdot 4H_2O$, and $Ca(ClO_3)_2 \cdot 2H_2O$, and can therefore be classified as a simple eutonic-type system. Analysis of the solubility diagram shows that, with increasing temperature, the solubility of calcium chlorate in aqueous solution increases, thereby enhancing its salting-out effect relative to $CaCl_2$. As a result, the eutonic solutions become progressively enriched in $Ca(ClO_3)_2$, while the relative content of $CaCl_2$ decreases. Therefore, an increase in temperature and $Ca(ClO_3)_2$ concentration leads to an expansion of the calcium chlorate crystallization field. These conditions are favorable for the separation of calcium chlorate from the $CaCl_2$–$Ca(ClO_3)_2$–H_2O system by crystallization.

It should be noted that, within the framework of this study, the quantitative characteristics of the process were monitored by titration of the liquid and solid phases (iodometric determination of active chlorine and chlorate, complexometric determination of calcium and magnesium, mercurimetric determination of chloride ion), whereas the systematic quantitative assessment of the degree of calcium recovery, the degree of conversion, and the yield and purity of the target product is planned to be presented in a subsequent paper. The present work focuses on the physicochemical justification of the process: the characterization of the secondary raw material, the choice of conditions for its acid processing, and the construction of the phase diagram of the $Ca(ClO_3)_2$–$CaCl_2$–H_2O system, which determines the choice of crystallization conditions for the target product.

Thus, the conducted studies established the technological feasibility of obtaining a calcium chloride-containing solution by treating the secondary product (precipitate) generated in the Caustic Soda Production Department of Navoiyazot JSC with hydrochloric acid, followed by its conversion to calcium chlorate using sodium hypochlorite. During the conversion of calcium chloride to calcium chlorate, the effects of sodium hypochlorite consumption, reagent molar ratio, temperature, and reaction time on the product composition and conversion degree were evaluated; the quantitative characteristics of these dependences will be reported in a subsequent paper.

Conclusion

The obtained results demonstrated that the calcium-containing components of the precipitate can be selectively recovered and converted into calcium chlorate. The physicochemical basis of the process has been established: the composition of the secondary raw material has been characterized, the conditions of its acid processing have been substantiated, and the phase diagram of the $Ca(ClO_3)_2$–$CaCl_2$–H_2O system has been constructed. A quantitative assessment of the degree of recovery, conversion, and yield of the target product is the subject of further research. This approach provides a scientific basis for a technological scheme aimed at the comprehensive utilization of mineral components present in the secondary product, reduction of the amount of generated waste, and production of a calcium chlorate-containing product.

References

1. F.E. Umirov, F.I. Khudoyberdiev. Research results on the production of calcium hypochlorite and calcium chlorate using waste from soda manufacturing // Ta'lim fidoyilari. – 2022. – P. 265–271.
2. F.E. Umirov, F.I. Khudoyberdiev. A study of the chemical properties of distiller liquid–a waste product from soda ash manufacturing // International Journal of Advanced Technology and Natural Sciences. – 2022.
3. F.E. Umirov, F.I. Khudoyberdiev. A study of the physicochemical properties of distiller liquid from the Kungrad Soda Plant. – 2022. – 410 P.
4. F.E. Umirov, G.R. Nomozova. Obtaining new products through the processing of soda industry waste. – 2023.
5. D. Azimova, D. Salikhanova, I. Eshmetov [et al.]. Wastewater treatment using heat-treated defectate and MAP solution // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2023. – Vol. 1142, No. 1. – Art. 012079. – DOI: 10.1088/1755–1315/1142/1/012079.
6. H. Majidov, F. Umirov, S. Kodirov. Physicochemical properties of soda industry distillation solutions and structural analysis of products synthesized in the presence of sodium hypochlorite // Universum: Technical Sciences. – 2026. – No. 4 (145). – P. 248–257.
7. Solubility of components in the aqueous system of sodium chlorate, urea, and ammonium salts of phosphoric and 2-chloroethylphosphonic acids / Sh. Sh. Yakubov [et al.] // Uzbek Chemical Journal. – 2022. – No. 6.
8. F.E. Umirov, G.R. Nomozova, S. Zakirova. Production and application of defoliants based on sodium hypochlorite with sodium, magnesium, and calcium chlorates. – Minsk: BSTU, 2021.
9. S.A. Tuychiev, A.S. Togasharov, O.O. Rakhmanov [et al.]. Solubility of Components in the Magnesium Chlorate–Thiourea–Water System // Russian Journal of Inorganic Chemistry. – 2025. – Vol. 70, No. 14. – P. 2232–2238. – DOI: 10.1134/S0036023625603058.
10. Ergashev, D.A. Conceptual technological scheme for the production of a new multifunctional defoliant / D.A. Ergashev // Scientific and Technical Journal of FerPI. – 2020. – Vol. 24, No. 1. – P. 211–215.

OIL AND GAS INDUSTRY. HYDROCARBON PROCESSING

Received: 15.10.2026
Accepted: 19.11.2026
Published: 28.11.2026

УДК 665.7+547.29

Investigation of the synthesis process of higher fatty acids from secondary paraffin feedstock

Fozilov Hasan
PhD, Associate Professor
Department of Oil and Gas Processing Technology, Bukhara State Technical University
Uzbekistan, Bukhara
Turobjonov Sadriddin
doctor of Technical Sciences
Academician, Tashkent State Technical University
Uzbekistan, Tashkent
Fozilov Sadriddin
doctor of Technical Sciences, Professor
Department of Oil and Gas Processing Technology, Bukhara State Technical University
Uzbekistan, Bukhara
Kholikova Sevara
doctor of Technical Sciences, Professor
Tashkent State Technical University
Uzbekistan, Tashkent

Исследование процесса синтеза высших жирных кислот из вторичного парафинового сырья

Фозилов Хасан Садриддин угли
PhD, доц.
кафедры технологии переработки нефти и газа, Бухарский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Бухара
Туробжонов Садритдин Махаматдинович
д-р техн. наук
. акад., Ташкентский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Бухара

Библиографическое описание: Исследование процесса синтеза высших жирных кислот из вторичного парафинового сырья // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Фозилов Х.С.У. [и др.]. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23773

For citation: Investigation of the synthesis process of higher fatty acids from secondary paraffin feedstock // Universum: Technical Sciences : electronic scientific journal. Fozilov H. et al. 2026. No. 11(152). Available at: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23773

Фозилов Садриддин Файзуллоевич
д-р техн. наук
. проф. кафедры технологии переработки нефти и газа, Бухарский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Бухара
Холикова Севара Жасуровна
д-р техн. наук
. проф. Ташкентский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Abstract

This study aimed to investigate the synthesis process of higher fatty acids from secondary paraffin feedstock and to determine the optimal technological conditions for their production. Secondary paraffin feedstock generated at the Fergana Oil Refinery was used as the research object. The products formed during the liquid-phase oxidation of paraffin hydrocarbons by atmospheric oxygen were subjected to stepwise vacuum fractional distillation, and the effects of distillation temperature and residual pressure on the composition and yield of the resulting acid fractions were systematically studied. Distillation was carried out at temperatures ranging from 160 to 310 °C and residual pressures of 266–20 Pa. The composition and yield of the fractions were monitored by gas chromatography, infrared (IR) spectroscopy, and acid-value titration (GOST 5985 / ASTM D664). As a result, fatty acid fractions with carbon chain lengths of C_5–C_6, C_7–C_9, C_{10}–C_{13}, C_{14}–C_{16}, C_{17}–C_{20}, and C_{20}^{+} were isolated. The maximum yield of the C_{14}–C_{16} fraction, 65 wt.% relative to the feedstock charged, was achieved at a distillation temperature of 200 °C and a residual pressure of 20 Pa. IR spectroscopy confirmed the presence of characteristic carboxyl and long-chain aliphatic functional groups in the synthesized products. The obtained results made it possible to determine effective technological conditions for the synthesis of synthetic higher fatty acids from secondary paraffin feedstock and can be applied in the development of resource-efficient technologies for petrochemical waste valorization.

Аннотация

Целью настоящей работы являлось исследование процесса синтеза высших жирных кислот из вторичного парафинового сырья и установление оптимальных технологических условий их получения. В качестве объекта исследования использовалось вторичное парафиновое сырьё Ферганского нефтеперерабатывающего завода. Продукты, образующиеся в результате жидкофазного окисления парафиновых углеводородов атмосферным кислородом, подвергались ступенчатой фракционной дистилляции под вакуумом; при этом изучалось влияние температуры и остаточного давления дистилляции на состав и выход кислотных фракций. Дистилляцию проводили в интервале температур 160–310 °C при остаточном давлении 266–20 Па. Состав и выход фракций контролировали методами газовой хроматографии, ИК-спектроскопии и определением кислотного числа (титрование по ГОСТ 5985 / ASTM D664). В результате исследования были выделены фракции жирных кислот состава C_5–C_6, C_7–C_9, C_{10}–C_{13}, C_{14}–C_{16}, C_{17}–C_{20} и C_{20}^{+}. Установлено, что максимальный выход фракции C_{14}–C_{16} достигается при температуре 200 °C и остаточном давлении 20 Па и составляет 65 % от массы загруженного сырья. Данные ИК-спектроскопии подтвердили

наличие характеристических карбоксильных и алифатических групп в синтезированных продуктах. Полученные результаты позволили определить эффективные технологические условия синтеза синтетических высших жирных кислот из вторичного парафинового сырья и могут быть использованы при разработке ресурсосберегающих технологий переработки нефтехимического сырья.

Keywords: secondary paraffin feedstock, paraffin hydrocarbons, higher fatty acids, synthetic fatty acids, liquid-phase oxidation, vacuum fractional distillation, acid fractions, residual pressure, acid value.

Ключевые слова: вторичное парафиновое сырьё, парафиновые углеводороды, высшие жирные кислоты, синтетические жирные кислоты, жидкофазное окисление, вакуумная фракционная дистилляция, кислотные фракции, остаточное давление, кислотное число.

Introduction

At present, the comprehensive and efficient utilization of hydrocarbon feedstocks in the petrochemical industry is considered one of the most important scientific and practical challenges [1]. Secondary paraffin feedstocks generated at oil-refining enterprises contain significant amounts of normal and isoparaffinic hydrocarbons, making them a promising raw material source for the production of high-value-added products [2]. The rational utilization of these resources not only enhances production efficiency but also contributes to waste reduction and environmental sustainability. Today, they are widely used in the manufacture of synthetic detergents, soaps, emulsifiers, plasticizers, corrosion inhibitors, lubricants, and surfactants [3]. The production of synthetic higher fatty acids through the liquid-phase oxidation of paraffinic hydrocarbons is regarded as one of the most economically efficient and industrially established technologies [4,5]. During this process, paraffinic hydrocarbons undergo oxidation in the presence of oxygen, forming intermediate products (alcohols, ketones, and hydroxy acids) that are subsequently converted into monocarboxylic fatty acids. The efficiency of the process depends on several technological factors, including feedstock composition, reaction temperature, oxidizing agent consumption, catalyst composition, reaction time, and other operating parameters [7,8]. Recent studies have shown that catalyst modification and physical pretreatment methods, such as ultrasonic activation, can further improve the selectivity and efficiency of the oxidation stage [9,10]. Despite the considerable number of studies conducted in recent years on the production of higher fatty acids from secondary hydrocarbon resources, the determination of optimal synthesis conditions for higher fatty acid production remains a relevant scientific challenge. This is primarily due to the compositional characteristics of secondary paraffin feedstocks and the complex mechanism of their oxidation process [6,13]. Accordingly, the present study investigates the synthesis of higher fatty acids from secondary paraffin feedstocks, with particular attention given to the effects of the main technological parameters of the vacuum distillation stage on the yield of the target products and their quality characteristics, and to clarifying the reaction pathway underlying their formation.

Materials and methods

Feedstock characterization. Secondary paraffin feedstock generated during the oil-refining process at the Fergana Oil Refinery was selected as the object of this study. Its main physicochemical properties were determined as follows: density at 20 °C of 0.780–0.810 g/cm³, pour point of 45–55 °C, oil content of 1.5–3.0 wt.%, molecular weight ranging from 250 to 420 g/mol, and a hydrocarbon composition consisting predominantly of C_{15}–C_{30} normal paraffins. The acid value was found to be below 0.5 mg KOH/g, while oxygen-containing compounds were virtually absent in the initial feedstock.

Oxidation stage. The synthesis of higher fatty acids was carried out under laboratory conditions in a reactor equipped with a temperature-control system, in which the secondary paraffin feedstock was oxidized in the liquid phase by atmospheric oxygen, in accordance with the general oxidation mechanism outlined in the Introduction [1,6]. The resulting reaction mixture (oxidate) — containing unreacted paraffins together with intermediate and final oxidation products (alcohols, ketones, hydroxy acids, and fatty acids) — was subsequently separated into individual acid fractions by stepwise vacuum fractional distillation, as described below. To avoid any ambiguity between the two process stages, all temperatures and residual pressures reported hereafter refer to the distillation stage and not to the oxidation stage itself.

Vacuum fractional distillation stage. The oxidate obtained in the previous stage was subjected to stepwise vacuum fractional distillation in order to isolate acid fractions of increasing carbon number. Distillation was performed in six consecutive steps at temperatures of 160–180 °C, 170–180 °C, 185 °C, 200 °C, 280 °C, and 310 °C, with the residual pressure reduced correspondingly from 266 to 20 Pa. The stepwise increase in temperature combined with the stepwise decrease in residual pressure made it possible to separate the acid fractions according to carbon number and to establish the influence of these two parameters on the yield and composition of each fraction.

Temperature Measurement. The temperatures employed during the vacuum distillation stage (160–180 °C, 170–180 °C, 185 °C, 200 °C, 280 °C, and 310 °C) were monitored using a digital thermocouple installed in the reactor. Temperature measurements were performed with an accuracy of ±1 °C and were continuously recorded throughout the process.

Residual Pressure Measurement. The residual pressure during vacuum distillation (400–20 Pa) was measured using an electronic vacuum gauge connected to the vacuum system. Pressure values were continuously monitored during distillation and maintained at the required levels throughout the operation.

Determination of Acid Fractions. The carbon-number distribution of the separated acid fractions (C_5–C_6, C_7–C_9, C_{10}–C_{13}, C_{14}–C_{16}, C_{17}–C_{20}, and C_{20}^{+}) was determined by gas chromatography (GC). The analysis enabled identification of the hydrocarbon chain length and composition of each fraction. In addition, the resulting products were characterized by infrared (IR) spectroscopy, with spectra recorded in the range of 4000–400 cm^{-1}.

Determination of Acid Value. The acid value of the separated fatty acid fractions was determined by titration with an alcoholic solution of potassium hydroxide (KOH), in accordance with the requirements of GOST 5985 or ASTM D664 standards, and was calculated using the standard relationship:

$AV = (V \times N \times 56.1) / m$

where AV is the acid value (mg KOH/g), V is the volume of KOH solution consumed during titration (mL), N is the normal concentration of the KOH solution (mol/L), and m is the mass of the analyzed sample (g).

Yield Calculation. The yield of each acid fraction was calculated as the ratio of the mass of the isolated fraction to the mass of the feedstock initially charged into the reactor, expressed as a percentage:

$Yield\ (wt.\%) = (m_fraction / m_feedstock) \times 100$

Results and discussions

The subsequent transformations of the oxygen-containing intermediates formed during the oxidation of secondary paraffin feedstocks are described by reactions (a) and (b) in Figure 1. In addition, the effects of the distillation parameters on these transformations and on the overall synthesis process were systematically investigated.

$$RCH_2 - CO - CH_2R + NaOH \rightarrow RCH_2 - COONa + CH_2R$$

$$RCH_2 - \underset{\underset{OH}{|}}{CH} - CH_2 - COOH + H_2O \rightarrow RCH = CH - CH_2 - COOH$$

Figure 1. Reaction pathway for the formation of higher fatty acids during paraffin oxidation: (a) oxidative cleavage of the intermediate ketone into two carboxylic acid fragments; (b) dehydration of the intermediate β-hydroxy acid to the corresponding unsaturated fatty acid

The oxidation products (oxidate) obtained from the secondary paraffin feedstock were subjected to stepwise fractional distillation under vacuum, and the effects of distillation temperature and residual pressure on the composition of the acid fractions and on product yield were investigated. The obtained results confirmed that carboxyl-containing compounds were formed through the oxidative cleavage of ketones and the dehydration of hydroxy acids generated during the oxidation process (Figure 1), a reaction pathway consistent with mechanistic studies reported for related paraffinic and fatty-alcohol feedstocks [6,11]. This interpretation is supported both by the experimental findings of the present study and by the gas-chromatographic and IR-spectroscopic analyses of the isolated fractions.

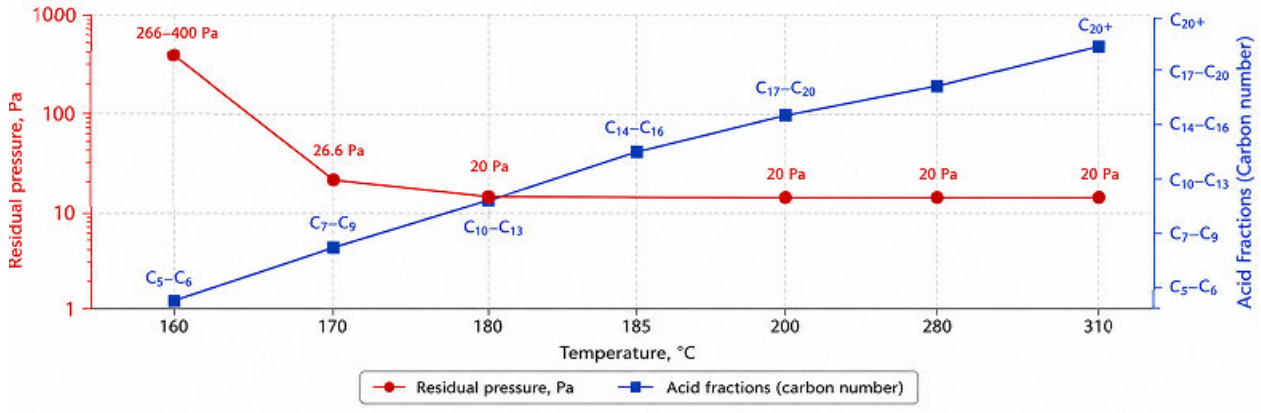


Figure 2. Effect of Distillation Temperature and Residual Pressure on Acid Fractions

As shown in Figure 2, an increase in distillation temperature led to a corresponding increase in the carbon number of the separated acid fractions. At a temperature range of 160–180 °C and a residual pressure of 266–400 Pa, predominantly low-molecular-weight acids with carbon chain lengths of C_5–C_6 were recovered. Increasing the temperature to 170–180 °C and reducing the pressure to 26.6 Pa resulted in the formation and separation of C_7–C_9 acid fractions. Under conditions of 185 °C and 20 Pa, C_{10}–C_{13} fractions were obtained, while C_{14}–C_{16}, C_{17}–C_{20}, and C_{20}^+ fractions were recovered at 200 °C, 280 °C, and 310 °C, respectively. These results indicate that increasing the distillation temperature under vacuum conditions enhances the boiling and separation of higher-molecular-weight fatty acids, thereby facilitating the recovery of heavier acid fractions, consistent with the distillation behavior reported for related fatty-acid mixtures [12].

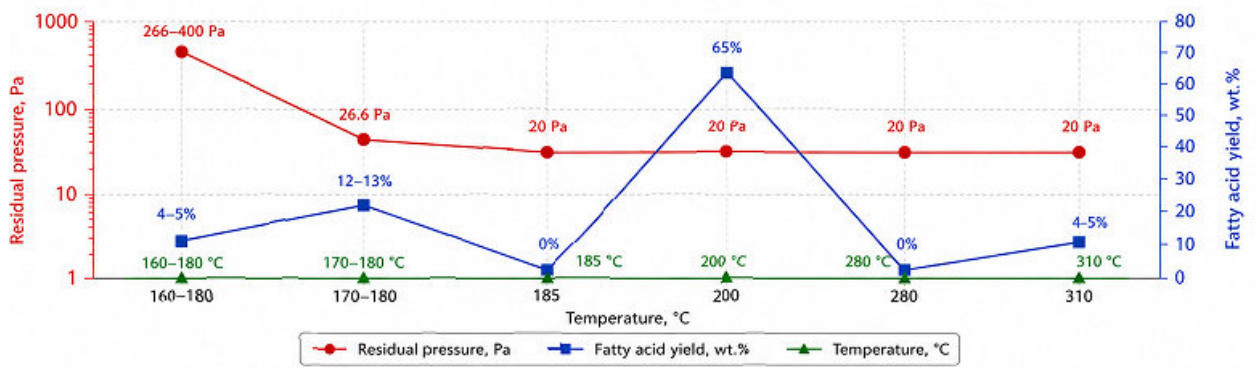


Figure 3. Effect of Distillation Temperature and Residual Pressure on Fatty Acid Yield

The results presented in Figure 3 demonstrate a strong dependence of fatty acid yield on distillation temperature. At 160–180 °C, the fatty acid yield was only 4–5 wt.%, while increasing the temperature to 170–180 °C resulted in a yield of 12–13 wt.%. When the temperature reached 200 °C, the yield increased sharply and attained a maximum value of 65 wt.%. This significant increase can be attributed to the predominance of medium-chain fatty acids (C_{14}–C_{16}) in the oxidation products. Although the separation of heavier fractions (C_{17}–C_{20} and C_{20}^+) was observed at distillation temperatures of 280 °C and above, their yields decreased considerably. This behavior is associated with the occurrence of secondary thermal transformations of certain oxidation products at elevated temperatures, as well as with the limited content of heavy fatty acid precursors in the original oxidate. The IR spectra of the higher fatty acids synthesized from secondary paraffin feedstocks exhibited intense absorption bands at 2954.86, 2914.65, and 2847.17 cm^{-1}. These absorption peaks correspond to the stretching vibrations of $–CH_3$ and $–CH_2–$ groups in long-chain aliphatic hydrocarbon radicals, confirming the presence of fatty acids derived from high-molecular-weight paraffinic chains in the synthesized products (Figure 4).

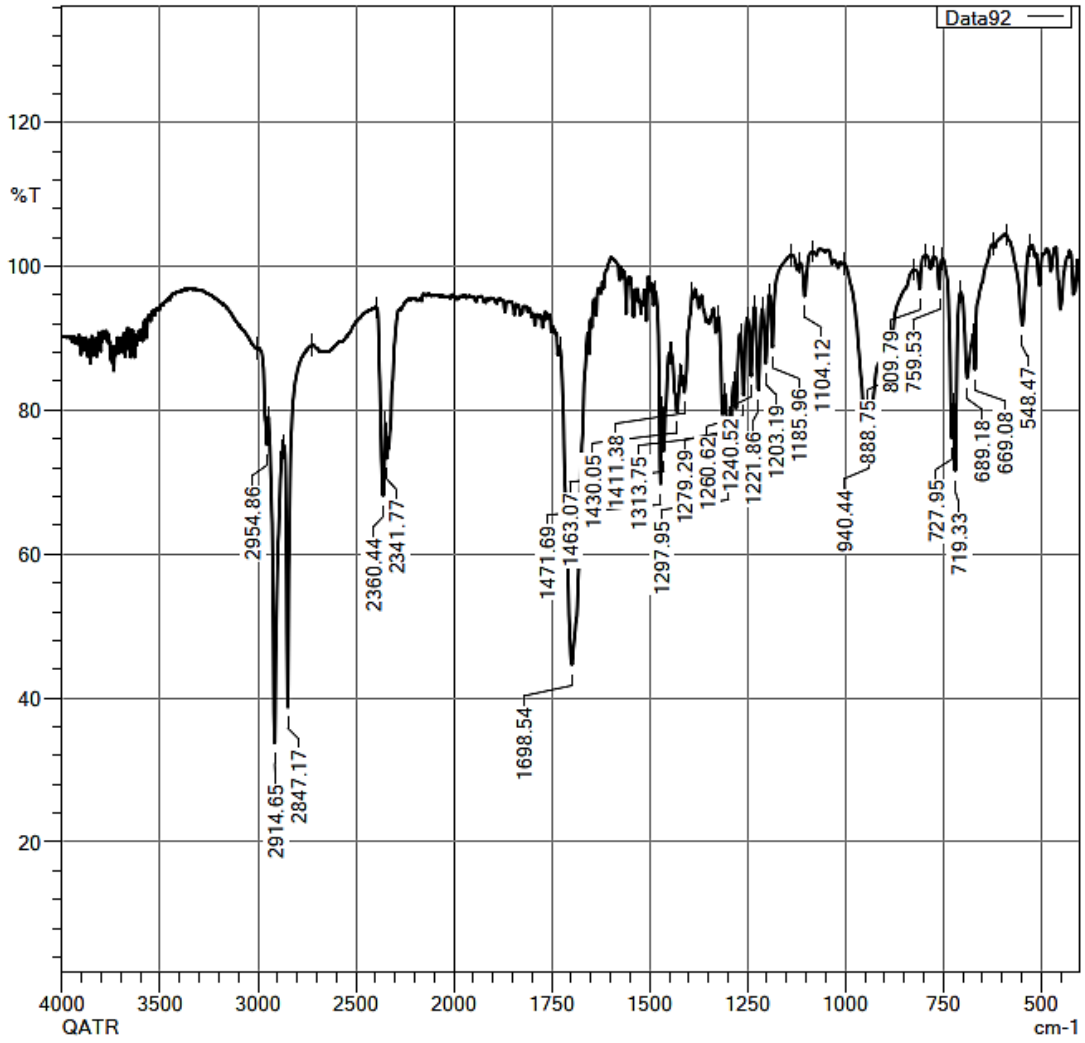


Figure 4. IR spectrum of higher fatty acids synthesized by oxidation of secondary paraffin raw materials

The absorption peak observed at 1698.54 cm^{-1} is associated with the stretching vibration of the C=O bond characteristic of carboxyl groups, confirming that oxidation of the paraffins led to the formation of carboxyl functional groups and the successful synthesis of higher fatty acids. The absorption bands at 1471.69 and 1463.01 cm^{-1} correspond to deformation vibrations of $–CH_2–$ groups, while the band at 1375.31 cm^{-1} is attributed to deformation vibrations of $–CH_3$ groups. The absorption peaks at 1297.59, 1279.29, 1262.66, 1240.52, and 1218.35 cm^{-1} are associated with vibrations of C–O bonds in simple ethers, indicating the presence of carboxylic and oxygen-containing compounds in the product composition. Furthermore, the absorption bands at 940.44, 888.75, 809.79, 795.53, 727.95, and 719.33 cm^{-1} correspond to vibrations of $–(CH_2)n–$ groups in long aliphatic chains, confirming that the synthesized substance fully corresponds to the expected structure of higher fatty acids.

Conclusion

As a result of the liquid-phase oxidation of secondary paraffin feedstock, followed by stepwise fractional distillation of the resulting oxidation products under vacuum, higher fatty acids with different molecular weights were successfully obtained. The experimental results showed that

at a distillation temperature range of 160–180 °C and a residual pressure of 266–400 Pa, the yield of the C_5–C_6 fraction was 4–5 wt.%, whereas at 170–180 °C and 26.6 Pa the yield of the C_7–C_9 fraction increased to 12–13 wt.%. The principal product of the distillation process was the C_{14}–C_{16} fraction, recovered at 200 °C and a residual pressure of 20 Pa, with a yield reaching 65 wt.% relative to the mass of the feedstock charged into the reactor. Further increases in distillation temperature to 280 °C and 310 °C resulted in the formation of C_{17}–C_{20} and C_{20}^{+} fractions, respectively; however, the yields of these heavier fractions decreased significantly and did not exceed 4–5 wt.%. These results indicate that, under the studied conditions, the oxidation products of paraffinic hydrocarbons are predominantly composed of medium-chain fatty acids in the C_{14}–C_{16} range, and that distillation temperature together with residual pressure is the key technological parameter governing both the composition and the yield of the isolated fractions. FTIR analysis confirmed the presence of characteristic carboxyl (C=O, 1698.54 cm^{-1}) and long-chain aliphatic (–CH_2–, –CH_3, 2954–2847 cm^{-1}) functional groups, corroborating the proposed reaction pathway (Figure 1) and demonstrating the successful conversion of secondary paraffin feedstock into valuable fatty acid products. These findings are consistent with recent reports on the oxidation of structurally related paraffinic and fatty-alcohol feedstocks [6,11], confirming the general applicability of the proposed oxidative-cleavage/dehydration pathway. From a practical standpoint, the established distillation conditions for maximizing the yield of the C_{14}–C_{16} fraction (200 °C, 20 Pa) provide a basis for the resource-efficient conversion of refinery by-products into higher fatty acids suitable for the production of synthetic detergents, lubricants, and surfactants [3]. Future research should focus on optimizing the catalytic system and incorporating pretreatment methods such as ultrasonic activation at the oxidation stage [9,10], as well as on techno-economic evaluation of the process for pilot- and industrial-scale implementation.

References

1. Akhmetov, S.A. Technology of Deep Oil and Gas Processing / S.A. Akhmetov. P. 341–342. – Saint Petersburg: Nedra Publishers, 2013.
2. Kapustin, V.M. Chemistry and Technology of Petroleum Refining / V.M. Kapustin, M.G. Rudin. P. 201–202. – Moscow: Khimiya Publishers, 2015.
3. Davidsohn, A. Synthetic Detergents: A Comprehensive Treatise / A. Davidsohn, B. Milwidsky. P. 124–125. – New York: Wiley-Interscience, 2004.
4. Bayanmunkh, M. Synthetic Fatty Acid from Crude Oil of the Tamsagbulag Petroleum Deposit (Mongolia) / M. Bayanmunkh [et al.] // Mongolian Journal of Chemistry. – 2021. – Vol. 22, No. 48. – P. 1–6.
5. Kamoliddin, K. Modification of Catalytic Systems in the Production of Synthetic Higher Fatty Acids by Oxidation of Paraffinic Hydrocarbons / K. Kamoliddin, B.B. Ismoilov, A.A. Khamidov // Universum: Technical Sciences. – 2023. – No. 5 (110). – P. 15–21.
6. U. Berdiyarov, S. Nuraliev, S.E. Nurmanov [et al.]. Obtaining Synthetic Fatty Acids Based on Paraffin and Studying the Mechanism of Its Formation // Universum: Technical Sciences. – 2024. – No. 5 (122). – DOI: 10.32743/UniTech.2024.122.5.17485.

7. Gulyamov, Kh. G. Technological Features of Synthetic Fatty Acid Production from Paraffin Feedstocks / Kh. G. Gulyamov, A.A. Nurmukhamedov // Chemical Technology. – 2020. – Vol. 21, No. 4. – P. 178–184.
8. Muslimov, M.M. Oxidation of Normal Paraffins with Atmospheric Oxygen in the Production of Synthetic Fatty Acids / M.M. Muslimov, B.A. Abdukarimov // Bashkir Chemical Journal. – 2019. – Vol. 26, No. 3. – P. 85–90.
9. Soobramoney, L. Flexible Pincer Backbone Revisited: CuSNS Complexes as Efficient Catalysts in Paraffin Oxidation / L. Soobramoney, M.D. Bala, H.B. Friedrich // Inorganica Chimica Acta. – 2021. – Art. 120508. – DOI: 10.1016/j.ica.2021.120508.
10. V.M. Abbasov, A.Z. Aliyeva, E. Kayahan [et al.]. Use of Ultrasonic Pretreatment in the Reaction of Liquid Aerobic Oxidation of C11, C14 Paraffin Hydrocarbons in the Presence of (RCOO)3Cr and (RCOO)2Ni Catalysts // Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering. – 2024. – Vol. 43, No. 2. – P. 707–713.
11. Shi, P. Synthesis and Optimization of Long-Chain Fatty Acids via the Oxidation of Long-Chain Fatty Alcohols / P. Shi, W. Liu, H. Su, Y. Li, Z. Zhu // Green Processing and Synthesis. – 2024. – Vol. 13, No. 1. – P. 386–394. – DOI: 10.1515/gps-2023-0237.
12. T. Changwatchai, M. Nakajima. Separation of Free Fatty Acid and Triglycerides by Molecular Distillation – Experimental and Simulation Approaches // Processes. – 2053. – Vol. 10. – Art. 2053. – DOI: 10.3390/pr10102053.
13. Smith, K.J. Oxidation Kinetics of Long-Chain Paraffinic Hydrocarbons / K.J. Smith, M.R. Gray // Fuel. – 1998. – Vol. 77, No. 5. – P. 391–398.

Received: 22.09.2026
Accepted: 12.11.2026
Published: 28.11.2026

УДК 665.7.038:665.637:665.344.8

Extraction of fatty acids from cottonseed oil soapstock using organic solvents

Samiyev Amin
Independent researcher
Bukhara State Technical University
Uzbekistan, Bukhara
E-mail: hakimovasabina1986@gmail.com
Fozilov Sadriddin
doctor of Technical Sciences, Professor
Department of Oil and Gas Processing Technology Bukhara State Technical University
Uzbekistan, Bukhara
Fozilov Hasan
PhD, Associate Professor
Department of Oil and Gas Processing Technology Bukhara State Technical University
Uzbekistan, Bukhara
Hakimova Sabina
Assistant
Bukhara State Technical University
Uzbekistan, Bukhara

Извлечение жирных кислот из соапстока хлопкового масла органическими растворителями

Самиев Амин Асламович
Независимый исследователь Бухарский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Бухара
Фозилов Садриддин Файзуллоевич
д-р техн. наук, проф.
кафедры технологии переработки нефти и газа, Бухарский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Бухара
Фозилов Хасан Садриддин угли
PhD, доц.
кафедры технологии переработки нефти и газа Бухарский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Бухара
Хакимова Сабина Шамсиддин кизи
ассистент
Бухарский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Бухара

Библиографическое описание: Извлечение жирных кислот из соапстока хлопкового масла органическими растворителями // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Самиев А.А. [и др.]. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23747

For citation: Extraction of fatty acids from cottonseed oil soapstock using organic solvents // Universum: Technical Sciences : electronic scientific journal. Samiyev A. et al. 2026. No. 11(152). Available at: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23747

Abstract

This article presents the results of an experimental study of the extraction of free fatty acids from cottonseed oil soapstock — a by-product of the alkaline refining of cottonseed oil — by single- and multi-stage liquid–liquid extraction. The effect of the organic solvent type (Grade A gasoline, Grade B gasoline, Nefras S3-70/95, n-hexane, and benzene) on the degree of fatty acid recovery was investigated at a temperature of 60 °C, a soapstock-to-extractant ratio of 1:8, and a phase contact time of 5 minutes per stage. It was found that at a mixing intensity of Re_m = 4000 and four extraction stages, the recovery degree of fatty acids reaches 90–92 %, with Grade B gasoline providing the best performance. The obtained results provide a basis for selecting an appropriate extractant and process regime for recovering fatty acids from soapstock under laboratory and pilot conditions, and the recovered fatty acids are regarded as a promising feedstock for the subsequent synthesis of pour-point depressant additives for high-paraffin crude oils, to be addressed in a separate study.

Аннотация

В статье представлены результаты экспериментального исследования процесса извлечения свободных жирных кислот из соапстока хлопкового масла — побочного продукта щелочной рафинации хлопкового масла — методом одно- и многоступенчатой жидкостной экстракции. Исследовано влияние природы органического растворителя (бензин марки А, бензин марки Б, нефрас С3-70/95, н-гексан, бензол) на степень извлечения жирных кислот при температуре 60°С, соотношении фаз «соапсток: экстрагент», равном 1:8, и продолжительности контакта фаз 5 минут на каждой ступени. Установлено, что при интенсивности перемешивания Re_m = 4000 и проведении процесса в 4 ступени степень извлечения жирных кислот достигает 90–92 %, при этом наилучшие показатели обеспечивает бензин марки Б. Полученные результаты позволяют обоснованно выбрать экстрагент и технологический режим для извлечения жирных кислот из соапстока в лабораторных и опытно-промышленных условиях; выделенные жирные кислоты рассматриваются как перспективное сырьё для последующего синтеза депрессорных присадок к высокопарафинистым нефтям, что станет предметом отдельной работы.

Keywords: soapstock, cottonseed oil, fatty acids, liquid–liquid extraction, extractant, recovery degree, extraction kinetics, multi-stage extraction.

Ключевые слова: соапсток, хлопковое масло, жирные кислоты, жидкостная экстракция, экстрагент, степень извлечения, кинетика экстракции, многоступенчатая экстракция.

Introduction

In the chemical and petrochemical industries, synthetic fatty acids are produced by the oxidation of saturated hydrocarbons (alkanes). The oxidation reaction of alkanes to fatty acids is carried out at high temperatures because saturated hydrocarbons react with great difficulty at normal temperatures [1, 2].

Generally, kerosene and oil distillate fractions, as well as solid paraffins, serve as raw materials for the production of synthetic fatty acids. Since paraffins mainly consist of saturated hydrocarbons, i.e., normal alkanes, predominantly unbranched saturated carboxylic acids are formed. In industry, hydrocarbons belonging to the middle fraction of paraffins by melting point, containing 12 to 20 carbon atoms in the molecule, are oxidized [3-5].

For oxidation purposes, air preheated to 110 °C is blown into the molten paraffin for a certain period [1, 2]. Potassium permanganate serves as a catalyst, which influences the chemical reaction pathway and improves the composition of the target products [1, 6].

Traditionally, free fatty acids are obtained from soapstocks, which are products of the alkaline refining of vegetable oils. Existing technologies for obtaining free fatty acids from soapstocks differ very little from one another. In all cases, the soapstock is initially decomposed by hydrolysis at a temperature of 160–180°C [1, 2]. Subsequently, the resulting emulsion mass is decomposed with a 5 % sulfuric acid solution at 80–90°C until the pH of the sulfate water (sodium sulfate) reaches 2–3 [1, 2]. The resulting mixture is allowed to settle and separates into two layers. After appropriate treatment, the upper layer of fatty acids enters vacuum distillation and is subsequently directed to household soap production. The remaining bottom portion is recycled back into the production cycle.

As an alternative to hydrolytic decomposition, fatty acids can be recovered from soapstock by direct liquid–liquid extraction with an organic solvent, without preliminary high-temperature hydrolysis. In practice, extraction gasolines obtained during petroleum refining are widely used for extracting target components in “liquid–liquid” systems, such as oil–raffinate systems. Extraction gasolines consist of mixtures of normal alkanes and isoalkanes of the C_nH_{2n+2} series, cycloparaffins of C_nH_{2n}, as well as relatively small amounts of aromatic hydrocarbons and minor quantities of unsaturated hydrocarbons. According to TSh 101303-72 [11], Grade A and Grade B extraction gasolines are produced, which differ slightly from each other: Grade A gasoline has a density of 685 kg/m³, an initial boiling point of 63 °C and a 98 % distillation temperature of 75 °C; Grade B gasoline has a density of 715 kg/m³, an initial boiling point of no less than 70°C and a 98 % distillation temperature of no less than 85°C.

The main advantages of extraction gasolines are a significantly large share of low-boiling saturated hydrocarbons, a small amount of aromatic hydrocarbons, good solubility of fats, low cost, and non-corrosiveness toward equipment; they are completely distillable from the oil and are practically insoluble in water. Their drawbacks include non-uniformity of chemical composition (depending on the oil field of origin), a wide range of boiling points, and flammability: the autoignition temperature of extraction gasolines is about 260–270 °C, and since gasoline vapour is about 2.7 times heavier than air, it accumulates in the lower part of a room and requires continuous ventilation. When selecting a solvent extractant, the following requirements were taken into account: maximum selectivity, high extraction capacity for the target component, low solubility in the raffinate, recyclability for reapplication, and availability at a reasonably low cost. Preliminary analysis showed that Grade A and Grade B extraction gasolines meet all the listed requirements; n-hexane, benzene and Nefras S3-70/95 were included in the comparison as reference solvents with well-defined, narrow boiling ranges.

Besides fatty acids, soapstock and the raffinate remaining after their extraction also contain gossypol and its derivatives, carried over from the crude cottonseed oil. The isolation of gossypol-containing residues as technical gossypol, and the utilisation of this by-product stream in the chemical and petrochemical industries, has been identified as a separate direction of practical interest [6]; related detoxification and valorisation strategies for cottonseed by-products are also discussed in the literature [10]. Within the scope of the present study, however, gossypol and its derivatives are only noted as a co-product that remains in the raffinate phase; their dedicated isolation, characterisation and the evaluation of fatty-acid-based depressant compositions are not addressed experimentally here and are planned as the subject of separate, follow-up work.

Despite the well-established general processing scheme outlined above, the comparative efficiency of different organic solvents and the stage-wise behaviour of fatty-acid extraction from cottonseed soapstock under multi-stage batch conditions have not been sufficiently studied in the available literature [7, 8].

The objective of the present work was to compare the extraction efficiency of five organic solvents – Grade A and Grade B extraction gasolines, Nefras S3-70/95, n-hexane, and benzene – for the recovery of free fatty acids from cottonseed oil soapstock, and to determine the optimal process parameters (phase ratio, mixing intensity, contact time, and number of extraction stages) for a laboratory-scale batch extraction process carried out at a technologically and safety-justified extraction temperature of 60 °C.

Materials and methods

Extraction method and process conditions. Single-stage batch extraction is the simplest method, wherein the initial solution and the extractant are mixed together; the mixture is then separated into two phases – the extract and the raffinate – in a separator-settler. The degree of extraction is increased either by raising the volume of extractant relative to the feedstock or by increasing the number of successive extraction stages. Batch-operated apparatuses of this kind are primarily used for small quantities and in laboratory practice; in the present work, laboratory multi-stage extraction was carried out as a system of successive single-stage extraction cycles imitating the operation of a multi-stage extraction column.

The effect of extractant type on the completeness of fatty-acid separation from soapstock was investigated using benzene, Nefras S3-70/95, Grade A and Grade B gasolines, and n-hexane, applied to soapstock pre-neutralized with sulfuric acid to pH 4–5. Each extraction run was carried out as a sequence of up to four contact stages under the following fixed conditions: extraction temperature of 60 °C; soapstock-to-extractant ratio of 1:8; mixing intensity corresponding to a mixing Reynolds number of Rem = 4000; and a contact time of 5 minutes per stage, selected so as to approach equilibrium while minimizing the excess amount of extractant relative to the amount of free fatty acids. The temperature of 60 °C was adopted as a practical upper bound for this system: it is well below the autoignition temperature of the gasoline extractants (about 260 – 270 °C, see Introduction) and the associated solvent-volatility hazard, while still being high enough to keep the soapstock sufficiently fluid for efficient phase contacting; no variation of temperature was performed in the present series of experiments.

Laboratory equipment. The batch-operated laboratory setup used to carry out the extraction process is shown schematically in Figure 1. Extraction was carried out in a glass separatory funnel (5) placed in a thermostated water bath (4) heated through a glass coil heat exchanger (3) connected to a constant-temperature thermostat (1); the required temperature was maintained and monitored with a reference thermometer (9). Mixing of the soapstock–solvent system was performed with paddle agitators (6) driven by electric motors (7), the rotation speed of which was regulated with a laboratory autotransformer (8). After each extraction stage the mixture was allowed to settle until complete phase separation, the upper (extract) layer was withdrawn, and a fresh portion of solvent was added to the raffinate for the next stage.

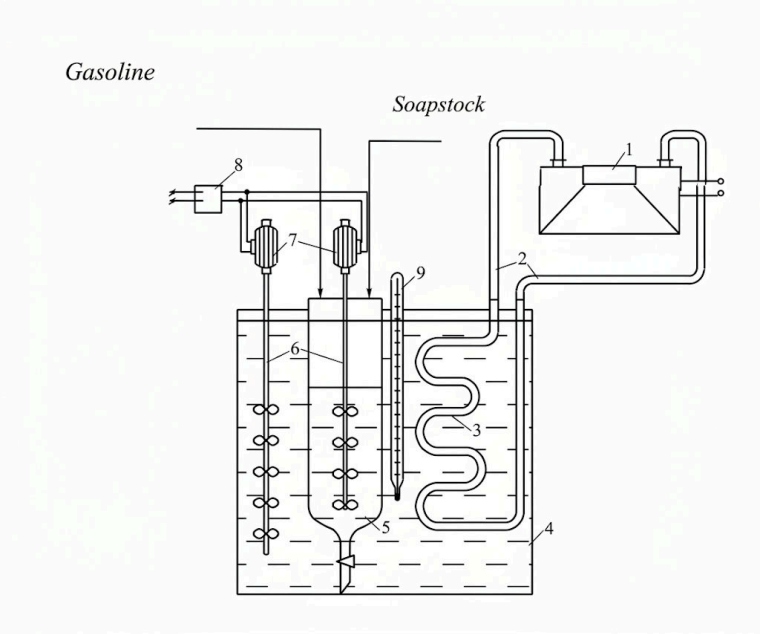


Figure 1. Schematic diagram of the laboratory batch extraction setup: 1 - constant-temperature thermostat; 2 - connecting hose system; 3 - glass coil heat exchanger; 4 - constant-temperature water bath; 5 - glass separatory extraction funnel; 6 - paddle agitators; 7 - electric motors; 8 - laboratory autotransformer; 9 - reference thermometer

Analytical method. The efficiency of the extraction process was quantified by calculating the degree of fatty-acid recovery (α), defined as:

$$\alpha = (As - Ar) / As \cdot 100\ \% \quad (1)$$

where α is the extraction degree of fatty acids, %; As is the initial mass concentration of fatty acids in the raw feedstock, %; and Ar is the residual mass concentration of fatty acids in the raffinate phase, %. The mass concentration of fatty acids in the feedstock and in the raffinate (As and Ar) was determined by acid–base titration of the hydrolysed sample with an alcoholic KOH solution in the presence of a phenolphthalein indicator. A weighed sample was hydrolysed and titrated to the phenolphthalein end-point; the volume of titrant consumed was used to calculate the acid value (mg KOH per g of sample), which was then converted to the mass fraction of fatty acids, A (%), using the relation $A = (V \cdot C \cdot M)/(10 \cdot m)$, where V is the volume of KOH solution consumed (mL), C is its molar concentration (mol/L), M is the average molar mass of the fatty acids present (taken as that of oleic acid, 282 g/mol, in accordance with common practice for vegetable-oil-derived fatty acid mixtures), and m is the sample mass (g). The quality of the recovered fatty-acid

fraction at the final stage was additionally assessed from the mass balance between the gravimetrically determined mass of the separated extract phase and the titrimetrically determined mass of fatty acids contained in it, which yielded the estimate of co-extracted non-fatty-acid impurities reported in the Results section; a full compositional characterisation of the product (fatty-acid composition, average molecular weight) was not performed in this study and is planned for subsequent work.

Materials

Depending on the specific technological scheme used for cottonseed oil and fatty acid production, significant quantities of secondary products and waste streams are generated. Alkaline refining aims to purify raw oils by removing associated non-glyceride impurities. Treatment with alkaline solutions neutralizes free fatty acids, yielding insoluble salts (soaps) whose dense aqueous solutions separate readily from the neutral oil matrix. This heavy soap emulsion is designated as soapstock.

Cottonseed soapstock typically possesses the following physico-chemical characteristics: colour ranging from dark brown to dark yellow with a greyish tint; consistency at 20 °C varying from liquid to ointment-like; a total fat mass fraction of no less than 35 %; and a combined mass fraction of fatty acids and light organic matter of no less than 30 %. The soapstock used in this study was obtained from a cottonseed-oil alkaline-refining plant and corresponded to the characteristics given above; the mass fraction of free and bound fatty acids in the sample, determined by acid–base titration after acid splitting of the sample (see Analytical method, above), was 38–40 %.

The main physical characteristics of the five solvents used, relevant to their performance as extractants, are summarised in Table 1. The Grade A and Grade B extraction gasolines are specified by TSh 101303-72 [11]; n-hexane and Nefras S3-70/95 were used as reference solvents of technical/reagent grade, and benzene conformed to GOST 9572 – 93 (Petroleum benzene. Specifications) [12].

Table 1. Main physical characteristics of the solvents used

Solvent	Density, kg/m³	Boiling range, °C
Grade A gasoline	685	63–75
Grade B gasoline	715	≥70 to ≥85
Nefras S3-70/95	730*	70–95*
n-Hexane	660*	68–69*
Benzene	876*	80.1*

** Standard reference values for the technical/reagent grades used (for benzene, see GOST 9572-93 [12] cited in the text).*

Results and discussion

Table 2 presents the experimentally obtained degree of fatty-acid recovery (α) from soapstock after one to four successive extraction stages, for each of the five solvents studied.

Table 2. Extraction efficiency of free fatty acids from soapstock using various organic solvents

Solvent	Stage 1 (%)	Stage 2 (%)	Stage 3 (%)	Stage 4 (%)
Grade A gasoline	40	58	74	90
Grade B gasoline	42	66	76	92
Nefras S3-70/95	34	44	66	82
n-Hexane	36	46	64	92
Benzene	40	48	66	90

The data in Table 2 show that single-stage extraction (stage 1) does not provide efficient separation of fatty acids from the feedstock with any of the solvents tested, the degree of recovery not exceeding 42 %. This is attributable to the complex composition of the soapstock mixture, which depends on the refining conditions (temperature, alkali concentration) used upstream. Increasing the number of contact stages from one to four substantially increases the recovery degree for all solvents: Grade B gasoline and n-hexane provide the highest final recovery (92 %), followed closely by Grade A gasoline and benzene (90 %), while Nefras S3-70/95 shows the lowest recovery (82 %) under the same conditions.

Worked example of the recovery calculation. To illustrate the application of Eq. (1) to the stage-wise data of Table 2, Table 3 presents a worked example for Grade B gasoline, taking the initial fatty-acid concentration in the soapstock as As = 39 % (the mid-point of the 38–40 % range determined for the feedstock sample; see Materials) and computing the residual concentration Ar = As·(1 − α/100) remaining in the raffinate after each stage.

Table 3. Worked example of the stage-wise mass-balance calculation (Grade B gasoline, As = 39 %)

Stage	α, %	Ar = As(1 − α/100), %
1	42	22.6
2	66	13.3
3	76	9.4
4	92	3.1

Stage-to-stage increase in recovery. Because the cumulative recovery values in Table 2 do not by themselves reveal the stage-wise dynamics of the process, the increase in recovery between successive stages, Δα, was additionally calculated for every solvent and is shown in Figure 2.

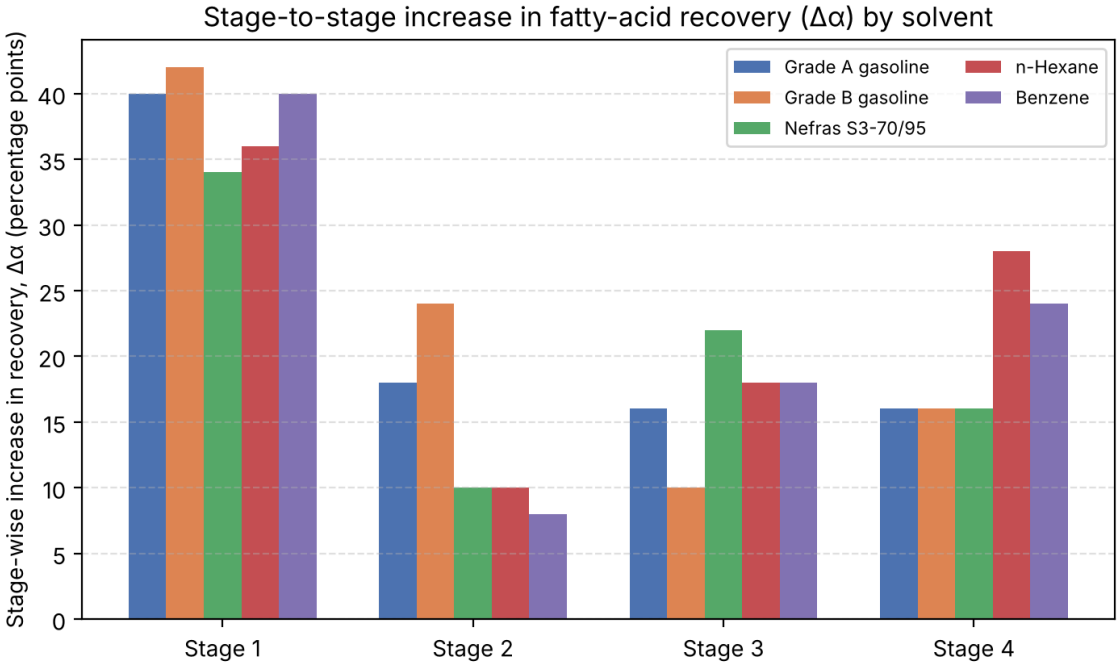


Figure 2. Stage-to-stage increase in fatty-acid recovery (Δα, percentage points) for the five solvents studied

For Grade A gasoline, the increments decrease monotonically from stage to stage (18 → 16 → 16 percentage points), consistent with a gradually diminishing driving force as the residual fatty-acid concentration in the raffinate decreases. For the other four solvents the increments are not monotonic: Grade B gasoline shows 24 → 10 → 16, Nefras S3-70/95 shows 10 → 22 → 16, n-hexane shows 10 → 18 → 28, and benzene shows 8 → 18 → 24. A purely diffusion-controlled, equilibrium-approaching process would be expected to show steadily decreasing increments, as observed for Grade A gasoline; the deviations seen for the other solvents are therefore considered most likely to reflect (i) the limited precision of the titrimetric determination of fatty-acid content, estimated at ±2–3 percentage points absolute, and (ii) stage-to-stage variability in the completeness of phase separation during manual settling and withdrawal of the extract layer, rather than a genuine change in extraction mechanism between stages. This is a limitation of the present single-replicate dataset. Accordingly, the present stage-wise recovery pattern should be treated as preliminary: it reflects assumptions inherent to the titrimetric method (fatty-acid molar mass taken as that of oleic acid) and the absence of replicate measurements, and resolving it will require replicate experiments at each stage, which are planned for the next phase of this work.

Taken together, the recommended regime for extracting free fatty acids from soapstock with extraction gasoline is: mixing intensity corresponding to Rem = 4000, a contact time of 5 minutes per stage, and at least four successive extraction stages, under which up to about 9 % of non-fatty-acid impurities are co-extracted into the target fatty-acid fraction together with the main product (see Analytical method). Reducing this level of co-extracted impurities while maintaining a high recovery degree requires intensification of the extraction process – for example, by increasing the driving force of mass transfer (a higher phase ratio or counter-current staging) and by reducing resistance to mass transfer at the phase interface (more intensive or alternative mixing methods, such as vibromagnetic mixing, which has been reported in the literature for related soapstock

systems [7, 8]). A systematic investigation of such intensification approaches, including a direct comparison with continuous and vibromagnetic extraction equipment, was beyond the scope of the present study and is planned as a separate stage of this research.

The obtained results are consistent with the stated objective of the work: a quantitative comparison of five organic solvents for fatty-acid extraction from cottonseed soapstock has been obtained, together with a worked example of the stage-wise mass-balance calculation and an analysis of the stage-to-stage recovery pattern, and a justified choice of optimal process parameters (solvent, phase ratio, mixing intensity, number of stages) at the fixed, safety-justified temperature of 60 °C. The novelty of the present results lies not in the extraction method as such – extraction of fatty acids from soapstock with gasoline is a known industrial technique – but in the systematic comparative evaluation of five solvents under identical multi-stage conditions and in the explicit, reproducible description of the calculation procedure and of the stage-wise recovery pattern, which provides a basis for the rational selection of extractant and regime and for the subsequent use of the recovered fatty acids as feedstock for depressant-additive synthesis, to be addressed in follow-up work.

Conclusion

The results obtained show that liquid–liquid extraction with organic solvents is an effective method for recovering free fatty acids from cottonseed oil soapstock. Among the five solvents studied (Grade A and Grade B extraction gasolines, Nefras S3-70/95, n-hexane and benzene), Grade B extraction gasoline provided the best combination of extraction performance (up to 92 % recovery after four stages) and the favourable technical and economic properties typical of extraction gasolines (low cost, good fat solubility, non-corrosiveness, ready recyclability). The recommended process regime – a temperature of 60 °C, a soapstock-to-extractant ratio of 1:8, a mixing intensity corresponding to Rem = 4000, a contact time of 5 minutes per stage, and at least four extraction stages – allows up to 90–92 % of the free fatty acids contained in the soapstock to be recovered.

A worked example of the stage-wise calculation procedure and an analysis of the stage-to-stage increase in recovery ($\Delta\alpha$) were presented for Grade B gasoline; the latter revealed a non-monotonic pattern for most solvents, most likely attributable to the precision limits of the titrimetric method and to stage-to-stage variability in phase separation. Given the single-replicate dataset and the simplifying assumptions used in the analytical method, the present results should be regarded as those of a preliminary investigation, to be confirmed by replicate experiments and a fuller compositional characterisation of the product in future work.

As noted in the Introduction, gossypol and its derivatives remained concentrated in the raffinate phase under the present conditions; their dedicated isolation as technical gossypol and the evaluation of fatty-acid-based depressant compositions remain the subject of separate, ongoing follow-up work.

The fatty acids recovered from cottonseed soapstock represent an inexpensive secondary raw material that, after appropriate chemical modification, can serve as feedstock for the synthesis of composite polymer-based pour-point depressant additives for high-paraffin crude oils – an approach consistent with current developments in polymeric pour-point depressants for waxy crude oils [9].

References

1. Lebedev, N.N. Chemistry and Technology of Basic Organic and Petrochemical Synthesis / N.N. Lebedev. – Moscow: Khimiya Publ., 1988. – 588 P.
2. Kuliev, R. Sh. Improving the antioxidant and anticorrosive properties of vegetable oils / R. Sh. Kuliev, F.A. Kuliev, A.A. Mutaliboyeva [и др.] // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. – 2005. – No. 6. – P. 41–43.
3. Sultanov, A.S. Chemistry and Technology of Oil and Gas Processing: Textbook / A.S. Sultanov, N.A. Abdullayev. – Tashkent: Uzbekistan Publ., 2012. – 240 P.
4. Nadirov, K.S. Processing of Organic Raw Materials: Textbook / K.S. Nadirov, G. Zh. Bimbetova, S.A. Sakibaeva, A.K. Orynbasarov. – Shymkent: Alem Publ., 2016. – 200 P.
5. Nadirov, K.S. Extraction of fatty acids from a mixture of gossypol resin components in a vibromagnetic extractor / K.S. Nadirov, G. Zh. Bimbetova, Kh. A. Ashirbaev [и др.] // Actual Problems of Modern Science – 2015: materials of the XI Intern. sci.-pract. conf. Vol. 6. – Prague: Education and Science Publ., 2015. – Vol. 6. – P. 68–72.
6. Mavlonov, Sh. M. Prospects for using cottonseed soapstock and technical gossypol residues in the chemical and petrochemical industries / Sh. M. Mavlonov, S.F. Khodjayev // Uzbek Chemical Journal. – 2021. – No. 4. – P. 52–58.
7. Sytnik, N. Technology development of fatty acids obtaining from soapstock using saponification / N. Sytnik, E. Kunitsia, V. Kalyna [и др.] // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2021. – Vol. 5, No. 6–113. – P. 16–23. – DOI: 10.15587/1729–4061.2021.242621.
8. Kalyna, V. Improvement of technology of fatty acids obtaining from oil and fat production waste / V. Kalyna, S. Stankevych, L. Myronenko [и др.] // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2022. – Vol. 2, No. 6–116. – P. 6–12. – DOI: 10.15587/1729–4061.2022.254358.
9. Elarbe, B. Synthesis, characterization and evaluation of stearyl acrylate-co-behenyl acrylate copolymer as a pour point depressant of waxy crude oil / B. Elarbe, I. Elganidi, N. Ridzuan [и др.] // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. – 2021. – DOI: 10.1007/s13202-021-01408-7.
10. Liu, Y. Multiple strategies to detoxify cottonseed as human food source / Y. Liu, Y. Zhai, Y. Li [и др.] // Frontiers in Plant Science. – 2022. – Vol. 13. – Art. 1080407. – DOI: 10.3389/fpls.2022.1080407.
11. ТШ 101303-72. Extraction gasolines, Grades A and B: technical specification. – 1972.
12. ГОСТ 9572–93. Petroleum Benzene. Specifications. – Moscow: Standartinform Publ.

MECHANICAL ENGINEERING AND ROBOTICS

Received: 03.11.2026
Accepted: 08.11.2026
Published: 28.11.2026

УДК 621.73+621.777+004.9

Hot extrusion of a 40Kh steel gear shaft: qform simulation of the thermo-mechanical fields and experimental validation of geometry, fibre flow and as-forged properties

Komilov Islom Raimkulovich
Assistant, Lecturer
Department of Metals Technology, Machinery and Equipment, Mechanical Engineering Almalyk State Technical Institute
Uzbekistan, Almalyk
ORCID: 0009-0006-2480-0960
E-mail: islom.komilov1992@gmail.com
Abdullaev Fathulla Sagdullaevich
doctor of Technical Sciences, Professor
Department of Metal Technology Islom Karimov Tashkent State Technical University
Uzbekistan, Tashkent
Abdukaxxarov Abduaziz Abdulazizxon ugli
doctor of Philosophy (PhD)
in Technical Sciences, Department of Metals Technology, Machinery and Equipment, Mechanical Engineering Almalyk State Technical Institute
Uzbekistan, Almalyk
Ahmadaliyev Shoxrux Shuhratovich
doctor of Philosophy (PhD)
in Technical Sciences
Department of Metals Technology
Machinery and Equipment, Mechanical Engineering
Almalyk State Technical Institute
Uzbekistan, Almalyk
Jakhonov Shokhrukh Alikul ugli
Doctoral Student
Department of Metals Technology
Machinery and Equipment, Mechanical Engineering
Uzbekistan, Almalyk State Technical Institute
Uzbekistan, Almalyk

Библиографическое описание: Горячее выдавливание зубчатого вала из стали 40Х: моделирование термомеханических полей в QForm и экспериментальная проверка геометрии, волокнистой структуры и свойств после ковки // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Комилов И.Р. [и др.]. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23704

For citation: Hot extrusion of a 40KH steel gear shaft: qform simulation of the thermo-mechanical fields and experimental validation of geometry, fibre flow and as-forged properties // Universum: Technical Sciences : electronic scientific journal. Komilov I.R. et al. 2026. No. 11(152). Available at: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23704

Jurakulov Ikhtiyor Choriyevich
Doctoral Student
Department of Metals Technology
Machinery and Equipment, Mechanical Engineering
Almalyk State Technical Institute
Uzbekistan, Almalyk
Abdullaeva Malika Khusniddin qizi
Student
Department of Metals Technology, Machinery and Equipment
Mechanical Engineering
Almalyk State Technical Institute
Uzbekistan, Almalyk

Горячее выдавливание зубчатого вала из стали 40Х: моделирование термомеханических полей в QForm и экспериментальная проверка геометрии, волокнистой структуры и свойств после ковки

Комилов Ислом Раимкулович
ассистент кафедра «Технологии металлов машины и оборудование, машиностроение», Алмалыкский государственный технический институт
Республика Узбекистан, г. Алмалык
Абдуллаев Фатхулла Сагдуллаевич
д-р техн. наук, проф.
кафедра «Технология металлов», Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Абдукаххаров Абдуазиз Абдулазизхон угли
д-р филос. (PhD)
по техническим наукам, кафедра Технологии металлов, машины и оборудование, машиностроение, Алмалыкский государственный технический институт
Республика Узбекистан, г. Алмалык
Ахмадалиев Шохрух Шухратович
д-р философии (PhD)
по техническим наукам, кафедра «Технологии металлов, машины и оборудование, машиностроение», Алмалыкский государственный технический институт
Республика Узбекистан, г. Алмалык
Жахонов Шохрух Аликул угли
базовый докторант
кафедра Технологии металлов, машины и оборудование, машиностроение, Алмалыкский государственный технический институт
Республика Узбекистан, г. Алмалык
Журакулов Ихтиёр Чориевич
базовый докторант
кафедра Технологии металлов, машины и оборудование, машиностроение, Алмалыкский государственный технический институт
Республика Узбекистан, г. Алмалык
Абдуллаева Малика Хусниддин кизи
студент кафедры
Технологии металлов, машины и оборудование, машиностроение, Алмалыкский государственный технический институт
Республика Узбекистан, г. Алмалык

Abstract

Gear shafts are usually turned and milled from bar stock, which converts a large share of the purchased metal into chips. This study develops a two-operation hot extrusion route for a stepped gear shaft (overall length 185 mm, hub diameter 64 mm) made of 40Kh chromium steel (ГОСТ 4543; equivalent to AISI 5140 / 40Cr) and validates its finite-element model against forging trials. The process was simulated in QForm 11.2.0 with a 1200 °C billet, H13 dies preheated to 200 °C and a graphite–water lubricant. The simulation gave peak forming loads of about 0.31 MN and 0.60 MN for the first and second operations and a workpiece temperature span of 794–1197 °C at the end of forming (volume-weighted mean 1094 °C, median 1133 °C). Forged parts reproduced the nominal diameters within −0.10 to +0.31 mm and the length within +1.0 mm. The fibre pattern and the location of a shoulder defect predicted by the model matched the macro-etched sections of real forgings. Compared with the as-received bar, the forged material showed an ultimate tensile strength of 875 MPa against 652 MPa (+34 %), a Brinell hardness of 173–200 HBW against 143 HB, and a higher KCU impact toughness (70–110 against 60–90 J/cm²) with essentially unchanged ductility. The extrusion billet weighs 1.96 kg instead of 2.40 kg, an 18.3 % reduction in metal input per part. The results show that a validated QForm model can be used to set the billet size and process window for near-net hot extrusion of gear shafts before die manufacture.

Аннотация

Валы-шестерни обычно изготавливают токарной обработкой и фрезерованием из пруткового проката, в результате чего значительная часть закупаемого металла переходит в стружку. В данном исследовании разработан двухпереходный технологический процесс горячего выдавливания ступенчатого вала-шестерни (общая длина 185 мм, диаметр ступицы 64 мм) из хромистой стали 40Х (ГОСТ 4543; аналог AISI 5140 / 40Cr), а также проведена верификация конечно-элементной модели по результатам опытной штамповки. Моделирование процесса выполнено в среде QForm 11.2.0 при температуре заготовки 1200 °C, температуре предварительного нагрева штампов из стали H13 до 200 °C и использовании графитоводной смазки. По результатам моделирования максимальные усилия деформирования составили порядка 0,31 МН и 0,60 МН для первого и второго переходов соответственно, а диапазон температур поковки в конце формообразования находился в пределах 794–1197 °C (средневзвешенная по объёму температура — 1094 °C, медианная — 1133 °C). Отштампованные детали воспроизвели номинальные диаметры с отклонениями от −0,10 до +0,31 мм, а длину — в пределах +1,0 мм. Траектория волокон макроструктуры и расположение дефекта в зоне галтели, спрогнозированные моделью, совпали с картиной травленых макрошлифов реальных поковок. По сравнению с исходным прокатом предел прочности деформированного металла увеличился с 652 до 875 МПа (+34 %), твёрдость по Бринеллю возросла со 143 НВ до 173–200 HBW, а ударная вязкость KCU повысилась (70–110 по сравнению с 60–90 Дж/см²) при практически неизменной пластичности. Масса заготовки для выдавливания составила 1,96 кг вместо 2,40 кг, что обеспечивает снижение расхода металла на деталь на 18,3 %. Полученные результаты подтверждают, что верифицированная модель в QForm позволяет научно обоснованно определять размеры заготовки и технологическое окно параметров для точного горячего выдавливания валов-шестерён до этапа изготовления оснастки.

Keywords: hot extrusion, closed-die forging, gear shaft, 40Kh (40Cr) steel, finite element simulation, QForm, metal flow, fibre structure, material saving.

Ключевые слова: горячее выдавливание, горячая объемная штамповка, вал-шестерня, сталь 40Х (40Cr), конечно-элементное моделирование, QForm, течение металла, волокнистая структура, экономия металла.

1. Introduction

Gear shafts combine a shaft and a toothed rim in one body and transmit torque under bending, torsion and cyclic contact loads. Their service life depends on the continuity of the metal fibre along the stepped contour as much as on the base strength of the steel [1, 2]. When such parts are machined from round bar, the fibre is cut at every shoulder and a large part of the bar is lost as chips. Near-net hot forging and extrusion avoid both drawbacks, but they require a billet volume, a preform and a process window that fill the die without laps, underfill or excessive load [1, 3].

Finite-element (FE) simulation is now the standard way to design such processes before dies are made [3–5]. For shaft gears, Wang et al. designed a hot precision forging die set, used DEFORM to predict the forging force and metal flow, and reached grade-8 tooth profile accuracy in trials [6]. Rajendran et al. compared two near-net die designs for an 18CrNiMo7-6 pinion shaft and showed that material input and machining fall while die stress rises [7]. Wang et al. optimised forging speed, die preheating, friction and workpiece temperature for a spiral bevel gear with an orthogonal design of simulations [8]. Bartnicki et al. mapped the forming limits of rotational compression of hollow stepped shafts [9]. These studies agree that model inputs, above all flow stress, friction and heat transfer, decide whether the simulation can be trusted, and that the prediction has to be checked on real parts.

The flow stress of steels in hot working is usually described by the Zener–Hollomon parameter and the hyperbolic-sine (Arrhenius) law [10–12]. For 40Cr steel, the grade closest to 40Kh, Chen et al. calibrated a strain-compensated Arrhenius model over 1023–1323 K and 0.01–10 s^{-1} with an average absolute relative error of 3.89 % and R = 0.992 [13], and Teng et al. reported errors below 4.86 % for 750–1050 °C [14]. Dynamic recrystallisation (DRX) during such deformation refines the grain and is the main reason why hot-worked steels can exceed the strength of the as-rolled bar [15]. Defects such as laps and underfill can also be predicted from the FE flow field [16].

Published work on 40Kh gear shafts, however, rarely closes the loop between simulation and the finished forging: the computed temperature field, the predicted defect sites, the fibre pattern, the dimensional accuracy and the resulting mechanical properties are seldom reported together for one part. Industrial plants in Uzbekistan still machine this class of parts from bar [18, 19]. The aim of this work was therefore to (i) build a QForm model of a two-operation hot extrusion route for a 40Kh gear shaft, (ii) quantify its temperature and load predictions, and (iii) validate the model against forged parts in terms of geometry, defect location, macrostructure and mechanical properties, together with the metal saving achieved. The novelty of the work lies in the closed validation loop for one industrial part: the same QForm model that set the billet size was checked against the defect site, the fibre pattern, the dimensions and the properties of serial forgings.

2. Materials and methods

2.1. Part, material and billet

The part is an axisymmetric stepped gear shaft with an overall length of 185 mm. It consists of four main segments of 27, 51, 32 and 75 mm length with nominal diameters of 30.102, 44.135, 64 and 41.686 mm; the 51 mm segment has a 2° taper, and the transitions carry R2 mm fillets (Fig. 1). The 64 mm hub is forged as a cylinder, and the teeth are generated by subsequent machining.

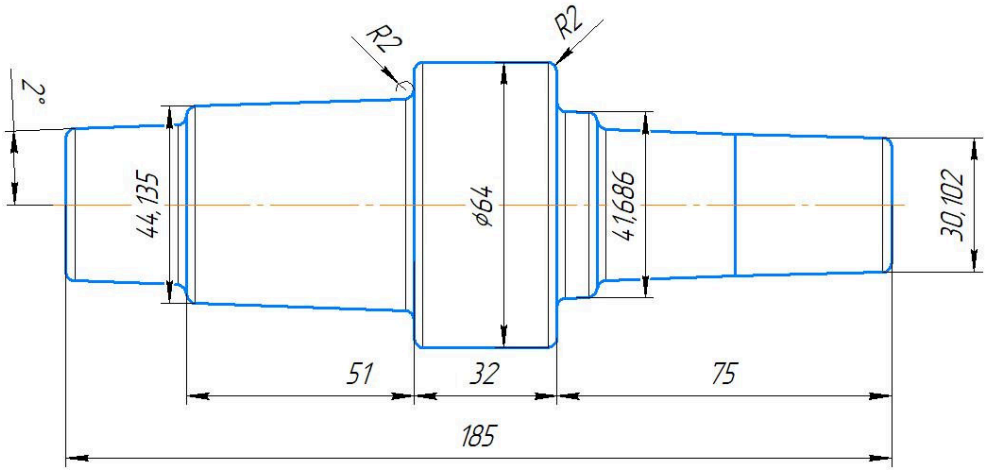


Figure 1. Forging drawing of the gear shaft (dimensions in mm)

The material is 40Kh chromium structural steel to ГОСТ 4543–2016 (C 0.36–0.44, Si 0.17–0.37, Mn 0.50–0.80, Cr 0.80–1.10, Ni ≤ 0.30, Cu ≤ 0.30, S ≤ 0.035, P ≤ 0.035 wt%) [20]. Billets were cut from 32 mm hot-rolled bar. The cut length of the extrusion billet is 310 mm (mass 1.96 kg at ρ = 7850 kg/m³). The billet previously used for the same part in the plant had the same diameter and a length of 380 mm (2.40 kg).

2.2. Process route and tooling

The route comprises billet cutting, induction heating, Operation I (preliminary upsetting into a stepped preform), Operation II (closed-die extrusion in a split die, in which the punch drives metal radially into the hub cavity and then upsets the flange), removal of excess metal, heat treatment, machining and inspection. The die has two half-dies with a horizontal parting plane, a punch surrounded by a pressure sleeve, a counter-punch with a support sleeve, and spring-returned levers that lock the half-dies while the radial component of the metal pressure tends to open them.

2.3. Finite-element model

Both operations were simulated in QForm 11.2.0. Because the forged contour is a body of revolution, the problem was solved in the axisymmetric formulation with adaptive remeshing (Fig. 2). The flow stress of 40Kh was taken from the QForm material database as a tabulated function of equivalent strain, strain rate and temperature:

$$\sigma_f = f(\bar{\varepsilon}, \dot{\bar{\varepsilon}}, T), \quad (1)$$

where σ_f is the flow stress (MPa), $\bar{\varepsilon}$ the accumulated equivalent plastic strain, $\dot{\bar{\varepsilon}}$ the equivalent strain rate (s^{-1}) and T the absolute temperature (K). In the Arrhenius form commonly used for such data [10–12],

$$\dot{\bar{\varepsilon}} = A\,[\sinh(\alpha\sigma_f)]^n \exp(-Q/RT),\; Z = \dot{\bar{\varepsilon}} \exp(Q/RT), \tag{2}$$

with material constants A, α, n and the activation energy Q (R = 8.314 J mol^{-1} K^{-1}). The forming window of the present process (about 800–1200 °C) lies largely inside the range in which the strain-compensated Arrhenius model of 40Cr has been calibrated [13, 14].

The dies were treated as rigid bodies of H13 tool steel (HRC 50) with heat exchange. Table 1 lists the process parameters. The lubrication condition “graphite–water” [17] was assigned; in QForm this entry defines both the friction law at the die–workpiece contact and the contact heat-transfer coefficient. The forming load was taken as the axial reaction on the moving die,

$$F_z = \left| \int_{S_{c}} t \cdot e_z \, dS \right|, \tag{3}$$

where S_c is the contact surface, t the traction vector and e_z the unit vector of the die stroke; the deformation work was obtained by integrating the load–stroke curve, $W = \int F(s)\, ds$.

Table 1. Initial and boundary conditions of the QForm model

Parameter	Operation I	Operation II
Workpiece material	40Kh steel	40Kh steel
Initial workpiece temperature	1200 °C	inherited from Operation I
Die material	H13, HRC 50	H13, HRC 50
Initial die temperature	200 °C	200 °C
Equipment parameter in the model	16 MN	16 MN
Stop distance	2 mm	1 mm
Air transfer / dwell on die before forming	4 s / 3 s	4 s / 2 s
Lubricant	graphite–water	graphite–water

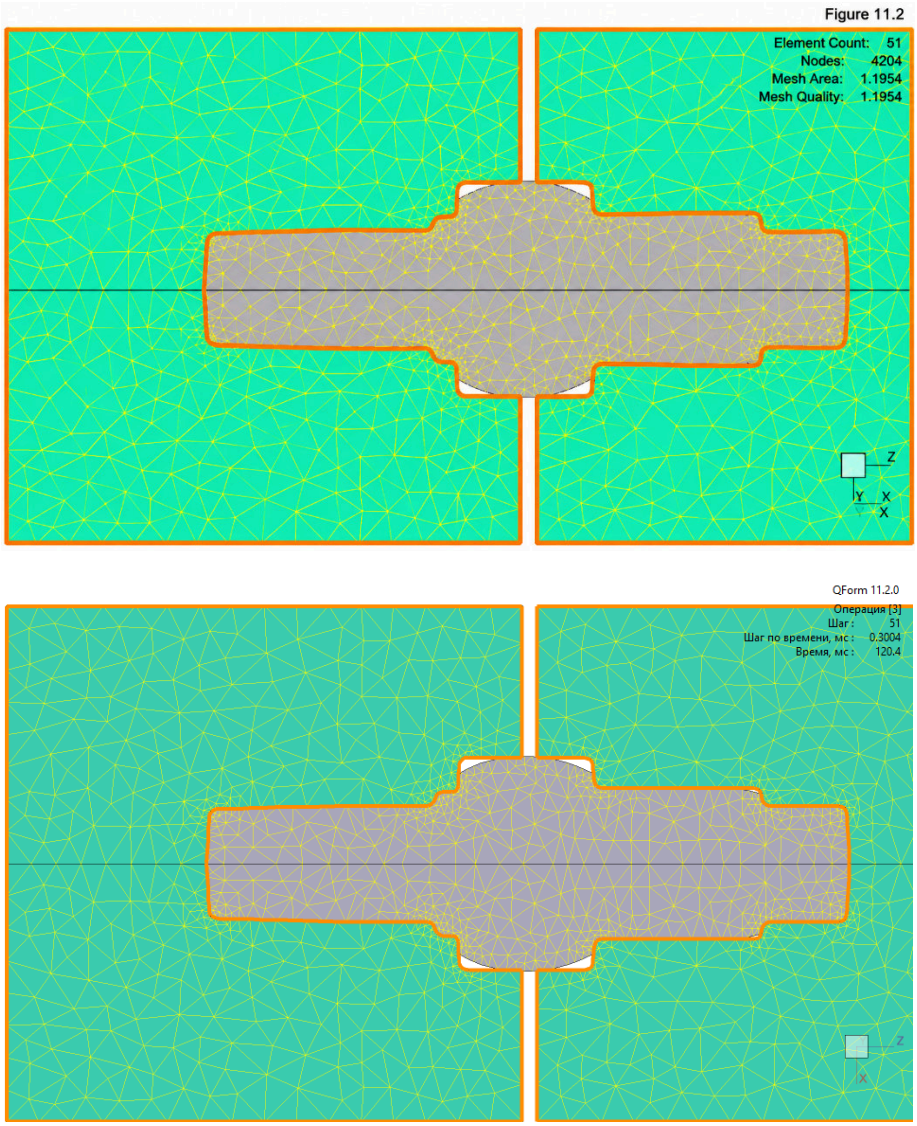


Figure 2. Axisymmetric FE model of the gear shaft between the half-dies with the adaptive triangular mesh

2.4. Forging trials and measurements

Forging trials were carried out at Geoburtexnika LLC (Uzbekistan) with the developed die. The main diameters and lengths of the forgings were measured with a calliper and a micrometer, and the deviation from the nominal value was calculated as $\Delta d = d_{meas} - d_{nom}$.

Tensile properties were determined on a computer-controlled 600 kN universal testing machine (ISO 7500 – 1, class 0.5, load accuracy ±0.5 %) following ГОСТ 1497 / ISO 6892 – 1 [21]; $\sigma_B = F_{max}/S_0$ and $\delta = (L_1 - L_0)/L_0 \times 100$ %. Brinell hardness was measured on a HBRV-187.5 universal hardness tester with a 10 mm carbide ball, a test force of 3000 kgf (29.42 kN) and a 10 s dwell, following ISO 6506 – 1 [22], at five points along the forging after the surface had been ground without overheating. U-notch impact toughness (KCU) was determined on a pendulum impact tester. Longitudinal sections of the forgings were macro-etched to reveal the fibre pattern. All properties were compared with those of the as-received bar.

3. Results

3.1. Metal flow and die filling

Figure 3 shows the forming sequence of Operation II. Metal first flows axially along the shank cavities while the hub zone remains open; the punch then drives the gathered volume radially into the hub cavity, and in the final stage the pressure sleeve lowers the upper half-die and upsets the flange until the corners are filled. The flow-line grid (Fig. 6a) bends sharply only at the hub, while the shank segments deform almost uniformly. Operation II ended after about 75 ms of die contact (74.9 ms at the last computed step).

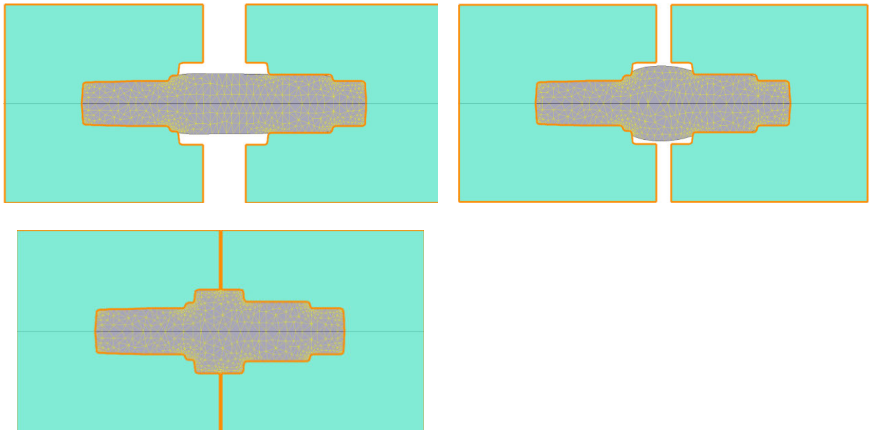


Figure 3. Stages of die filling in Operation II: (a) start of contact, (b) radial flow into the hub cavity, (c) end of forming

3.2. Temperature field

The computed temperature fields are summarised in Table 2. At the end of both operations the workpiece temperature spans about 400 °C. Most of the volume stays hot: in Operation II the volume-weighted mean is 1093.8 °C, the median 1133.3 °C and the standard deviation 95.1 °C (Fig. 4). The 5th and 95th percentiles are 830.3 °C and 1179.6 °C. The cold tail of the distribution corresponds to the thin surface layers in contact with the 200 °C dies: about 5 % of the volume is at or below 830 °C, the lower forging limit recommended for 40Kh, and the minimum reaches 794 °C.

Table 2. Temperature of the workpiece computed by QForm at the end of each operation

Quantity	Operation I	Operation II
Initial temperature, °C	1200	inherited
Maximum, °C	1194.97	1196.79
Minimum, °C	793.55	794.14
Span ΔT, °C	401.42	402.65
Volume-weighted mean / median, °C	–	1093.8 / 1133.3
Standard deviation, °C	–	95.1
5th / 95th percentile, °C	–	830.3 / 1179.6

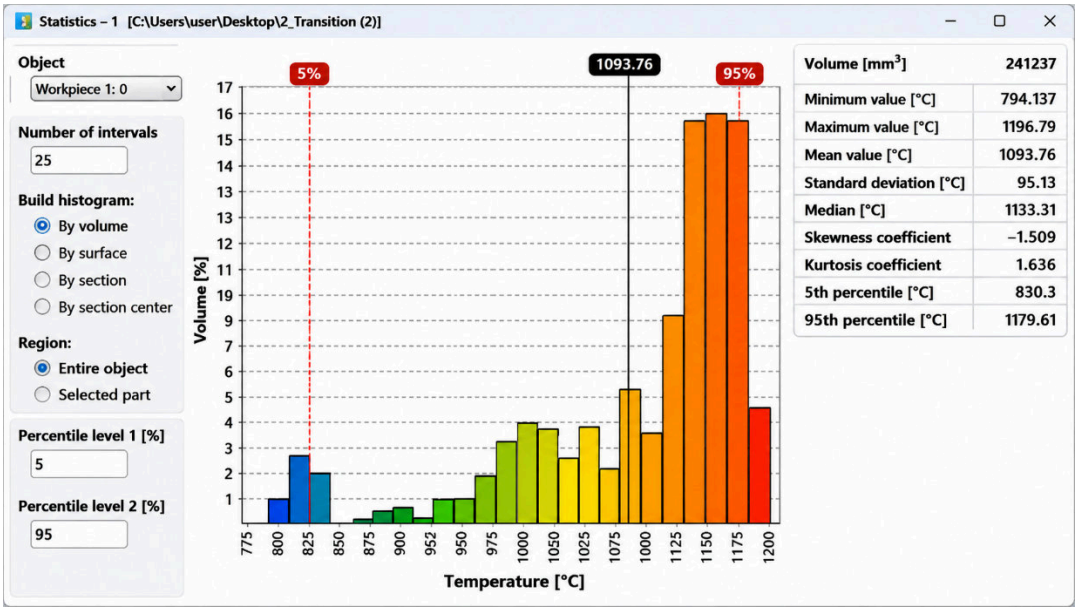


Figure 4. Volume distribution of temperature in the workpiece at the end of Operation II (QForm output; workpiece volume 241 237 mm³)

3.3. Stress state and forming load

The effective stress (Fig. 5) is highest in the hub and at the shoulder transitions, where the flow changes from axial to radial and contact is greatest; it reaches about 128 MPa at the end of forming. The shank ends remain at low stress. The load–time curves rise slowly during free upsetting and sharply during final filling. Their peaks are about 0.31 MN in Operation I and 0.60 MN in Operation II, read from the computed curves over deformation times of about 0.11 s and 0.075 s, respectively. Both peaks are well below the 16 MN equipment parameter in the model.

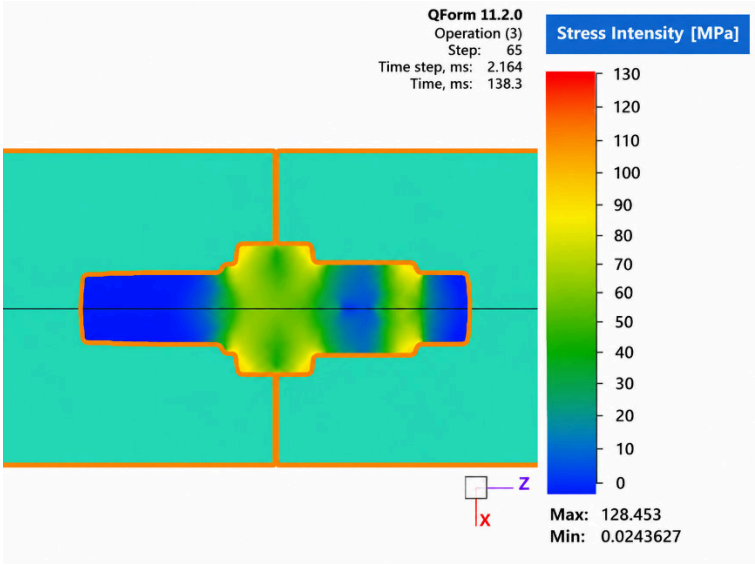


Figure 5. Distribution of effective stress (MPa) at the final forming step (QForm output)

3.4. Dimensional accuracy

Table 3 compares the measured dimensions of a forged part with the nominal values. The hub diameter and fillet radius were reproduced exactly. The two shank diameters are 0.30 and 0.31 mm oversize (+0.68 % and +0.75 %), the end diameter is 0.10 mm undersize (−0.34 %), and the length

is 1.0 mm longer (+0.54 %). The oversize on the shanks is consistent with the elastic opening of the half-dies under radial pressure and with thermal shrinkage allowances, and it stays within the machining allowance.

Table 3. Nominal and measured dimensions of the forging

Dimension	Nominal, mm	Measured, mm	Δ, mm	Δ, %
Overall length	185	186	+1.00	+0.54
Hub diameter	64	64	0	0
Shank diameter (51 mm segment)	44.135	44.435	+0.300	+0.68
Shank diameter (75 mm segment)	41.686	42.0	+0.314	+0.75
End diameter	30.102	30.0	−0.102	−0.34
Fillet radius	R2	R2	0	0

3.5. Defect prediction and fibre structure

The model predicted a local surface defect at one shoulder transition. The same defect appeared at the same location on a forging from the trial batch (Fig. 6c, circled). This shows that the model can flag defect sites before the dies are made, so that the preform or the fillet at that shoulder can be corrected.

The simulated flow-line grid and the macro-etched section of a real forging are compared in Fig. 6a,b. In both, the fibres follow the outer contour without interruption, are compressed and bent at the hub, and return to an axial orientation in the shanks. Fibre continuity along the shoulders is the expected benefit of forming over machining from bar, where the fibre is cut at every step.

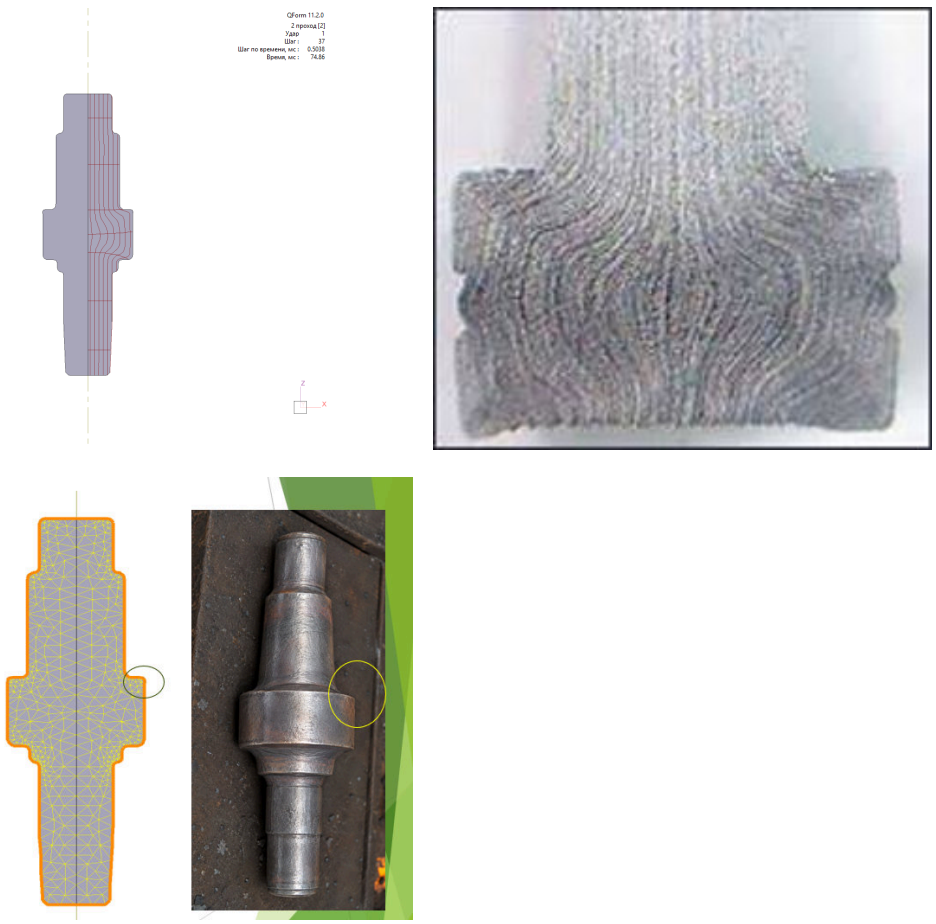


Figure 6. (a) Flow-line grid computed by QForm at the end of Operation II; (b) macro-etched section of a forged part; (c) predicted (left) and observed (right) defect at a shoulder transition

3.6. Mechanical properties

Table 4 summarises the properties of the as-received bar and of the forged material. The ultimate tensile strength increased from 652 to 875 MPa (+34 %), the limit stress (Table 4, note) from 340–390 to 580–700 MPa, and the hardness from 143 HB to 173–200 HBW. Ductility was essentially preserved: elongation fell slightly from 16–20 % to 14–18 %, and reduction of area rose from 45–55 % to 50–60 %. The KCU impact toughness range shifted upward from 60–90 to 70–110 J/cm². Hardness varied along the forging (Table 5): it was lowest in the hub and first transition (173 HBW) and highest in the small-diameter segment (200 HBW), where a larger strain and faster cooling are expected.

Table 4. Mechanical properties of 40Kh steel before and after hot extrusion

Property	Unit	As-received bar	After forging
Ultimate tensile strength, σ_B	MPa	652	875
Limit stress, σ_{lim}	MPa	340–390	580–700
Elongation, δ	%	16–20	14–18
Reduction of area, ψ	%	45–55	50–60
Brinell hardness	HB	143	173–200
Impact toughness, KCU	J/cm²	60–90	70–110

Ranges are the spread of the individual test results. σ_{lim} is the yield strength for the as-received bar and the elastic limit for the forged material, both taken from the tensile curves.

Table 5. Brinell hardness along the forging (HBRV-187.5, 10 mm ball, 3000 kgf, 10 s)

No.	Location	HBW
1	Central cylindrical (hub) part	173
2	First shoulder transition	173
3	Second shoulder transition	180
4	Small-diameter segment	200
5	Additional control point	180
	Mean ± SD	181.2 ± 11.1

3.7. Metal input and production time

The extrusion billet weighs 1.96 kg against 2.40 kg for the previous route, so metal input per part falls by 0.44 kg:

$$K_m = (m_1 - m_2) / m_1 \times 100\ \% = (2.40 - 1.96) / 2.40 \times 100\ \% = 18.33\ \%. \quad (4)$$

After implementation, the plant reported a reduction in metal consumption per part of 18–22 %, a 1.2–1.4-fold reduction in the time needed to produce a batch (16.7–28.6 % less time), and a 10–15 % gain in the efficiency of defect detection through the QForm model [19].

4. Discussion

Validity of the model. Three independent checks support the model: the predicted defect site matched the real forging, the computed fibre pattern matched the macro-etched section, and the forged diameters were within ±0.31 mm of nominal. This agreement is in line with earlier validation of DEFORM models of shaft-gear forging [6, 7] and shows that the QForm database description of 40Kh is adequate for process design in this temperature–rate window, which overlaps the range in which 40Cr models have been calibrated [13, 14]. Table 6 compares the scope of validation with that of comparable studies.

Table 6. Comparison with published FE-supported near-net forging studies of shaft-type gears

Study	Part / material	Software	Validation and outcome
Wang et al. [6]	Shaft gear	DEFORM	Precision forging trials; grade-8 tooth profile accuracy
Rajendran et al. [7]	Pinion shaft, 18CrNiMo7-6	DEFORM-3D	Industrial data; less material and machining, higher die stress
Wang et al. [8]	Spiral bevel gear	DEFORM 11.0	Orthogonal design of simulations; parameter set for minimum load
This work	Gear shaft, 40Kh	QForm 11.2.0	Defect site, fibre pattern, dimensions and properties of serial forgings; 18.3 % lighter billet

Process window. Two findings point to limits of the current settings. First, the 1200 °C initial temperature lies 20 °C above the upper end (1180 °C) of the commonly recommended hot-forging range of 40Kh (1180–830 °C). Deformation heating keeps the core near 1195 °C, which increases the risk of grain growth, scaling and decarburisation. Second, about 5 % of the volume, located in the die-contact layers, cools to or below the 830 °C finishing limit, with a minimum of 794 °C. Lowering the initial temperature to about 1150–1180 °C and shortening the 3 s dwell on the die in Operation I would narrow the temperature span from both sides. These changes should be checked with the same model before they are adopted.

Load and equipment. The computed peak load of 0.60 MN corresponds to about 61 tf. With a usual reserve factor of 1.25–1.3, the process needs a press of roughly 0.8 MN nominal force; the 16 MN value in the model is therefore an equipment setting, not a requirement. A smaller hydraulic press with controlled stroke would be sufficient, which lowers the capital and energy cost of the route. The peak loads were read from the plotted curves, and the exported numerical load–stroke data should be used for final press selection.

Properties. The 34 % gain in tensile strength and the higher hardness at nearly unchanged ductility are typical of hot working with DRX: the recrystallised fine grain and the forming-induced texture strengthen the material, while air cooling from the forging temperature is expected to give a finer ferrite–pearlite structure than in the as-rolled bar [15]; grain-size measurements are needed to confirm this. The highest hardness in the small-diameter segment is consistent with the larger strain and faster cooling expected there. Because 40Kh gear shafts are quenched and tempered after forging, the main value of these results is that forging leaves no weak or overheated zones and gives a continuous fibre, which supports the fatigue strength of the shoulders [1, 2].

Limitations. The flow-stress data of 40Kh were not calibrated for the specific bar batch used; friction and heat-transfer conditions were taken from the lubricant entry without a sensitivity study; and the property data come from a limited number of specimens. Future work should calibrate the 40Kh flow stress by hot compression tests, vary friction and initial temperature in a designed set of simulations [8], and quantify grain size after forging.

5. Conclusions

• A two-operation hot extrusion route for a 40Kh gear shaft was designed and simulated in QForm 11.2.0. The model predicted peak loads of about 0.31 MN and 0.60 MN and an end-of-forming temperature span of 794–1197 °C, with a volume-weighted mean of 1094 °C in Operation II.

• The model was validated on forged parts: the predicted defect site and fibre pattern matched the real forgings, and the diameters were reproduced within −0.10 to +0.31 mm.

• Hot extrusion raised the ultimate tensile strength of 40Kh from 652 to 875 MPa and the hardness from 143 HB to 173–200 HBW, with nearly unchanged ductility and a higher KCU impact toughness.

• The extrusion billet is 18.3 % lighter than the billet of the previous route (1.96 against 2.40 kg); in production the route reduced batch time by a factor of 1.2–1.4.

• The initial billet temperature should be lowered to the recommended range and the die dwell shortened to avoid overheating of the core and chilling of the surface below 830 °C.

References

1. Altan, T. Cold and hot forging: fundamentals and applications / T. Altan, G. Ngaile, G. Shen. – Materials Park, OH: ASM International. – 2005. – 340 P.
2. Jeswiet, J. Metal forming progress since 2000 / J. Jeswiet, M. Geiger, U. Kleiner [et al.] // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. – 2008. – Vol. 1, No. 1. – P. 2–17. – DOI: 10.1016/j.cirpj.2008.06.005.
3. Kobayashi, S. Metal forming and the finite-element method / S. Kobayashi, S.I. Oh, T. Altan. – New York: Oxford University Press, 1989.
4. Mackerle, J. Finite element modelling and simulation of bulk material forming: a bibliography (1996–2005) / J. Mackerle // Engineering Computations. – 2006. – Vol. 23, No. 3. – P. 250–342. – DOI: 10.1108/02644400610652983.
5. Vlasov, A.V. Finite element modeling of technological processes of forging and die forging / A.V. Vlasov, S.A. Stebunov, S.A. Evsyukov, N.V. Biba, A.A. Shitikov; ed. by A.V. Vlasov. – Moscow: Bauman MSTU Publishing House, 2019. – 384 P.
6. B. Wang, Z. Li, M. Zheng [et al.]. Modelling and experimental research in hot precision forging of shaft gear // MATEC Web of Conferences. – 2015. – Vol. 21. – Art. 02005. – DOI: 10.1051/matecconf/20152102005.
7. Rajendran, N. Hot forging die design optimization using FEM analysis for near-net forming of 18CrNiMo7-6 steel pinion shaft / N. Rajendran, C.C. Yurgel, W.Z. Misiolek, R.A. de Sousa // Metals. – 2023. – Vol. 13, No. 4. – Art. 815. – DOI: 10.3390/met13040815.
8. Wang, Z. Numerical simulation and process parameter optimization of warm forging near-net forming for spiral bevel gear / Z. Wang, C. Jiang, B. Wei, Y. Wang // Applied Sciences. – 2024. – Vol. 14, No. 3. – Art. 1147. – DOI: 10.3390/app14031147.
9. Bartnicki, J. Limits of the process of rotational compression of hollow stepped shafts / J. Bartnicki, J. Tomczak, Z. Pater // Materials. – 2019. – Vol. 12, No. 18. – Art. 3049. – DOI: 10.3390/ma12183049.
10. Zener, C. Effect of strain rate upon plastic flow of steel / C. Zener, J.H. Hollomon // Journal of Applied Physics. – 1944. – Vol. 15, No. 1. – P. 22–32. – DOI: 10.1063/1.1707363.
11. Sellars, C.M. On the mechanism of hot deformation / C.M. Sellars, W.J. McTegart // Acta Metallurgica. – 1966. – Vol. 14, No. 9. – P. 1136–1138. – DOI: 10.1016/0001–6160(66.
12. Lin, Y.C. A critical review of experimental results and constitutive descriptions for metals and alloys in hot working / Y.C. Lin, X.-M. Chen // Materials & Design. – 2011. – Vol. 32, No. 4. – P. 1733–1759. – DOI: 10.1016/j.matdes.2010.11.048.
13. Chen, L. Modelling of constitutive relationship, dynamic recrystallization and grain size of 40Cr steel during hot deformation process / L. Chen, W. Sun, J. Lin, G. Zhao, G. Wang // Results in Physics. – 2019. – Vol. 12. – P. 784–792. – DOI: 10.1016/j.rinp.2018.12.046.
14. Teng, L. Constitutive modelling and microstructure evolution of 40Cr alloy steel during hot compression deformation / L. Teng, C. Guo, L.Z. Wang // Materials Research Innovations. – 2013. – Vol. 17. – P. 135–143. – DOI: 10.1179/1432891713Z.000000000204.

15. Huang, K. A review of dynamic recrystallization phenomena in metallic materials / K. Huang, R.E. Logé // Materials & Design. – 2016. – Vol. 111. – P. 548–574. – DOI: 10.1016/j.matdes. 2016.09.012.
16. Fu, M. The prediction of macro-defects during the isothermal forging process by the rigid-viscoplastic finite-element method / M. Fu, Z. Luo // Journal of Materials Processing Technology. – 1992. – Vol. 32, No. 3. – P. 599–608. – DOI: 10.1016/0924–0136(92.
17. Bay, N. Environmentally benign tribo-systems for metal forming / N. Bay, A. Azushima, P. Groche [et al.] // CIRP Annals. – 2010. – Vol. 59, No. 2. – P. 760–780. – DOI: 10.1016/j.cirp. 2010.05.007.
18. Komilov, I.R. Mathematical modeling of the forging of a shaft-gear using the finite element method to improve production efficiency / I.R. Komilov, F.A. Abdukarimova // Current Problems and Solutions in the Processing of Mineral and Metallurgical Raw Materials in Uzbekistan: Conference Proceedings. – 2025. – P. 228–229.
19. Certificate of implementation for the hot-extrusion technology for a pinion shaft / Geoburtexnika LLC. – June 3. – 2026.
20. GOST 4543–2016. Metal products made of structural alloy steel. Technical specifications. – Moscow: Standartinform, 2016.ISO 6892–1:2019. Metallic materials – Tensile testing – Part 1: Method of test at room temperature. Pt. 1. – Geneva: ISO, 2019.
21. ISO 6506–1:2014. Metallic materials – Brinell hardness test – Part 1: Test method. – Geneva: ISO, 2014.

TEXTILE AND LIGHT INDUSTRY

Received: 14.09.2026
Accepted: 08.10.2026
Published: 28.11.2026

УДК 677.027.462

DOI: 10.32743/UniTech.2026.152.11.23561

Achieving uniform colorimetric properties in cotton and regenerated bamboo yarns

Nabieva Iroda Abdusamatovna
DSc, Professor
The Tashkent institute of textile and light industry Republic Uzbekistan, Tashkent
E-mail: niroda@bk.ru
Khasanova Makhfuza Shukhratovna
PhD, Associate Professor
The Tashkent institute of textile and light industry Republic Uzbekistan, Tashkent
E-mail: maxfuza.68@mail.ru
Norkulova Nargiza Isakul kizi
Assistant
The Tashkent institute of textile and light industry Republic Uzbekistan, Tashkent
E-mail: nargizanorqulova6@gmail.com
Abdumajidov Anvar Abdumalikovich
PhD, Associate Professor
The Tashkent institute of textile and light industry Republic Uzbekistan, Tashkent

Обеспечение равномерных колористических свойств пряжи из хлопковых и бамбуковых волокон

Набиева Ирода Абдусаматовна
д-р техн. наук, проф.
Ташкентский институт текстильной и лёгкой промышленности
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Хасанова Махфуза Шухратовна
канд. техн. наук, доц.
Ташкентский институт текстильной и лёгкой промышленности
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Библиографическое описание: Обеспечение равномерных колористических свойств пряжи из хлопковых и бамбуковых волокон // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Набиева И.А. [и др.]. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23561

For citation: Achieving uniform colorimetric properties in cotton and regenerated bamboo yarns // Universum: Technical Sciences : electronic scientific journal. Nabieva I.A. et al. 2026. No. 11(152). Available at: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23561

Норкулова Наргиза Исакул кизи
ассистент
Ташкентский институт текстильной и лёгкой промышленности
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Абдумажидов Анвар Абдумаликович
канд. техн. наук, доц.
Ташкентский институт текстильной и лёгкой промышленности
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Abstract

To ensure uniform coloration of blended fabrics based on regenerated regenerated bamboo yarn, a technology was developed that includes preparation of cotton yarn for finishing prior to weaving, followed by weaving and chemical finishing.

The capillarity and strength characteristics of yarn samples subjected to scouring and bleaching processes were determined.

The aim of the study was to select a treatment regime for cotton yarn that would bring its sorption and coloristic characteristics closer to those of regenerated bamboo yarn.

Taking into account the changes occurring in the cellulose macromolecule and in the morphology of cotton fiber during alkaline treatment, three preparation-for-finishing regimes were selected. The objective was to bring the sorption properties and fiber morphology of cotton closer to those of regenerated bamboo fiber by increasing the alkali concentration during the scouring process compared with the conventional method (Method 1), improving the mercerization process by replacing low-temperature treatment with room-temperature treatment and thereby reducing the alkali concentration (Method 2), and applying conventional mercerization treatment (Method 3).

The experimental results showed that the color intensity of cotton yarn prepared for finishing by the conventional method was 52.6 % lower than that of regenerated bamboo yarn when dyed with Reactive Red 224, and 52.3 % lower when dyed with Chemactive Navy Blue WB.

For samples dyed with Reactive Red 224, the cotton yarn sample with color intensity closest to that of regenerated bamboo yarn was obtained by scouring and bleaching at 70°C in an alkali solution with a concentration of 30 g/L. For samples dyed with Chemactive Navy Blue WB, the closest results were obtained for cotton yarn that had been scoured and bleached and then treated with a 10 % alkali solution at room temperature for 5 minutes, as well as for cotton yarn scoured and bleached at 70°C in an alkali solution with a concentration of 30 g/L.

For samples dyed with both dyes, the greatest difference compared with regenerated bamboo yarn was observed in cotton yarn samples subjected to scouring, bleaching, and mercerization, amounting to 28.1 % and 26.2 %, respectively.

Аннотация

С целью обеспечения равномерности окраски смесовых тканей на основе пряжи из регенерированного бамбукового волокна была разработана технология, предусматривающая подготовку хлопчатобумажной пряжи к отделке до процесса ткачества, последующее ткачество и химическую отделку.

Были определены показатели капиллярности и прочности образцов пряжи, подвергнутых процессам отварки и беления.

Цель работы заключалась в подборе режима обработки хлопковой пряжи, обеспечивающего сближение её сорбционных и колористических характеристик с характеристиками бамбуковой пряжи.

С учётом изменений, происходящих в макромолекуле целлюлозы и морфологии хлопкового волокна при щелочной обработке, были выбраны три режима подготовки к отделке. При этом ставилась цель приблизить сорбционные свойства и морфологию хлопкового волокна к свойствам бамбукового волокна за счёт повышения концентрации щёлочи в процессе отварки по сравнению с традиционным способом (1-й способ), совершенствования процесса мерсеризации, то есть снижения концентрации щёлочи за счёт замены низкой температуры на комнатную (2-й способ), а также обработки по традиционной технологии мерсеризации (3-й способ).

Приведённые экспериментальные результаты показали, что интенсивность окраски хлопчатобумажной пряжи, подготовленной к отделке традиционным способом, была ниже интенсивности окраски бамбуковой пряжи на 52,6 % при окрашивании красителем Reactive Red 224 и на 52,3 % при окрашивании красителем Chemactive Navy Blue WB.

При окрашивании красителем Reactive Red 224 наиболее близким к бамбуковой пряже по интенсивности окраски оказался образец хлопчатобумажной пряжи, подвергнутый отварке и белению при температуре 70°C в растворе щёлочи концентрацией 30 г/л. При окрашивании красителем Chemactive Navy Blue WB наиболее близкими оказались образцы хлопчатобумажной пряжи, подвергнутые отварке и белению с последующей обработкой 10 %-ным раствором щёлочи при комнатной температуре в течение 5 минут, а также отварке и белению при температуре 70°C в растворе щёлочи концентрацией 30 г/л.

Для образцов, окрашенных обоими красителями, наибольшее различие по сравнению с бамбуковой пряжей наблюдалось у образцов хлопчатобумажной пряжи, подвергнутых отварке, белению и мерсеризации, и составило соответственно 28,1 и 26,2 %.

Keywords: cotton and regenerated regenerated bamboo yarns, alkaline treatment, scouring and bleaching, capillarity, tensile strength, mercerization, color coordinates.

Ключевые слова: хлопковая пряжа и пряжа из регенерированного бамбукового волокна, щелочная обработка, отварка и отбелка, капиллярность, прочность на разрыв, мерсеризация, цветовые координаты.

Introduction

The steadily increasing demand for natural fibers has led to shortages in their industrial applications. To address this problem, researchers have proposed new ranges of textile materials produced from natural fibers derived from alternative raw materials [1]. In this context, particular attention has been paid to producing yarn from organic cotton fibers [2, 3], evaluating the quality characteristics of fabrics woven from these yarns, and drawing appropriate conclusions.

Fiber blending is used to improve yarn properties by enhancing the advantages of individual fibers and minimizing their limitations. Various fiber-blending methods are available, enabling the production of fabrics that are both durable and comfortable. In recent years, changes in the global environmental situation have increased attention to ecological and energy-related issues. This has encouraged the development and application of new environmentally friendly and sustainable blended textile materials [4, 5].

The production of finished products for various applications from fibers based on natural, biodegradable, and renewable polymers is currently developing rapidly. Regenerated bamboo fiber, obtained from an abundant natural biological resource, is now widely used in the textile industry [6].

Regenerated bamboo viscose is generally produced using a process similar to that employed for manufacturing viscose from wood cellulose [7]. In recent years, however, bamboo-derived regenerated cellulose fibers have also been produced using *N*-methylmorpholine *N*-oxide, as in the Lyocell process. This approach is regarded as an innovative technology because it has a lower environmental impact [8]. Owing to its porous structure and the relatively disordered arrangement of its macromolecules, the resulting bamboo-derived fiber has a higher moisture absorption capacity than many other natural fibers [9].

Researchers have investigated the production of new yarns from cotton and regenerated bamboo fibers, focusing on controlling their blend ratios and technical characteristics according to the intended application [10].

Studies have demonstrated that fabrics composed of regenerated cellulose fiber blends exhibit better mechanical and hygienic properties than fabrics in which these fibers are blended with cotton [11]. Viscose-Tencel and viscose-Modal blends have been proposed for this purpose, and their air permeability was found to be higher than that of all other fiber blends examined. In contrast, cotton-viscose fabrics showed the lowest mechanical and hygienic properties. This was attributed to the shorter staple length and lower elongation at break of cotton fiber (6.6 %) compared with viscose fiber (20 %) [12].

Several challenges must be addressed during the chemical finishing, particularly dyeing, of textile materials produced from blends of different fiber classes [13]. Blends of fibers with different origins can be used to manufacture casual and sportswear, hygienic woven and nonwoven products, and various composites. In fabrics containing cotton, flax, Modal, bamboo, and Lyocell fibers in different proportions, the dyeing process and resulting color strength must be controlled according to the fiber types and their blend ratios [14].

The mechanical strength of blended products decreases as the proportion of regenerated regenerated bamboo fiber increases. However, studies have shown that yarns containing 50 % cotton and 50 % regenerated bamboo fibers are comparable to 100 % cotton yarns in terms of breaking strength, unevenness, nep count, and other properties [15]. Another study investigated fabrics woven from a 50/50 cotton-regenerated bamboo blend and, for comparison, from 100 % regenerated bamboo yarn [16]. When 20 Ne yarn was used, the breaking strength of the blended fabric was 3.4 % lower than that of the 100 % regenerated bamboo fabric. For fabrics woven from 24, 30, and 40 Ne yarns, the corresponding reductions were 47.2, 29.7, and 30.5 %, respectively. Thus, the physical and mechanical properties of blended textiles depend not only on the nature of

the fibers but also on the yarn count. However, the fabric cover factor showed an inverse relationship with mechanical strength and was 3.7 – 6.7 % higher in fabrics woven from 50/50 cotton-regenerated bamboo yarn.

C.W. Kan and Y.L. Lam of Hong Kong Polytechnic University investigated the effect of low-temperature plasma treatment on the dyeability of regenerated bamboo-cotton blended fabric using two reactive dyes. The results showed that plasma treatment did not produce a significant increase in color strength at low dye concentrations. Dye uptake increased by only 3 %, while the plasma treatment did not alter the color of the dyed fabric [17]. The voids within a 70/30 bamboo-cotton blend were reported to enhance dye uptake by the fibers [18]. At 60 °C, the blended fabric achieved a dye fixation of 93 %, which was higher than that of 100 % regenerated bamboo fabric (91 %) but slightly lower than that of cotton fabric (96 %). These results suggest that the amorphous cellulose structure of regenerated bamboo enhances dye uptake but increases susceptibility to hydrolysis, whereas the crystalline regions of cotton improve stability [19].

The rubbing, washing, and perspiration fastness of bamboo-cotton fabrics was lower than that of fabrics produced from viscose-cotton and Modal-cotton yarns. However, bamboo-cotton fabrics exhibited the highest lightfastness. Based on color measurements after rubbing and the results of the fastness tests, the authors concluded that bamboo-cotton fabrics, despite their high dyeability, were more susceptible to color loss than fabrics made from viscose–cotton and Modal-cotton yarns [20].

The possibility of dyeing bamboo-cotton fabrics with natural dyes, in addition to reactive dyes, has also been investigated. In one study, the blended fabric was dyed with Gardenia dye, and its washing and light fastness were evaluated. The optimum conditions for dyeing the bamboo-cotton blended fabric with Gardenia dye were identified as 60 °C for 40 min [21].

Ring-spun yarns with a linear density of 19.68 tex, produced from regenerated bamboo and cotton fibers blended in different proportions, were reported to have better quality characteristics than both 100 % regenerated bamboo and 100 % cotton yarns. Yarn strength, unevenness, elongation at break, and breaking tenacity were evaluated [22]. The fiber ratio is particularly important when designing the technological sequence for spinning bamboo-cotton blended yarns. Studies have shown that when the regenerated bamboo content is increased to 30 %, the processing parameters conventionally used for cotton yarn production can still be applied on cotton-spinning equipment. However, the physical and mechanical properties of the fibers must be evaluated before spinning. Yarns containing 30 % regenerated bamboo and 70 % cotton fibers can be used to produce both woven and knitted fabrics [23].

The evolution, current methods, and future development of cotton bleaching have been reviewed because bleaching is an essential stage in textile production for achieving high whiteness and the desired appearance of the finished product. Conventional bleaching methods based on hydrogen peroxide and sodium hypochlorite have been examined together with their environmental limitations, particularly their high consumption of water, energy, and chemicals. Sustainable alternatives, including enzymatic, plasma, ozone, and nanocatalytic bleaching, have also been investigated. These methods can reduce environmental impact, better preserve fiber integrity, and support circular-economy principles such as the reuse of bleaching liquors and cotton recycling [24].

Three scouring methods were applied to open-end and ring-spun yarns before hydrogen peroxide bleaching, both in the presence and absence of metal ions. These methods included treatment with sodium hydroxide solution, extraction using a non-swelling solvent, and enzymatic scouring with pectinase. Changes in yarn strength and whiteness were evaluated after each processing stage [25].

Conventional hydrogen peroxide bleaching requires considerable energy, temperatures close to boiling, and treatment times exceeding 60 min. The effectiveness of triacetin, peracetic acid, and performic acid as hydrogen peroxide activators capable of reducing the temperature and duration of cotton bleaching has therefore been evaluated. The best results were obtained using triacetin at 0.9 g/L and peracetic acid at 1.0 g/L at 80 °C for 30 min. Under these conditions, the Berger whiteness index reached 61.1, corresponding to 97 % of the value achieved by conventional bleaching. These findings demonstrate the potential of this method for more environmentally sustainable textile production [26].

Newly developed cationic compounds that react rapidly with hydrogen peroxide to form peracids have been shown to considerably reduce the time required to obtain fabrics with commercially acceptable whiteness. In this study, a low-temperature cold pad-batch bleaching process was initially investigated using industrial formulations. The bleaching system based on a cationic activator and hydrogen peroxide substantially reduced the reaction time in batch bleaching, achieved a high degree of fabric whiteness, improved the physical properties of the fabric, and simplified the bleaching formulation [27].

Chemical finishing, including the dyeing of single- and multicomponent textile materials, remains a major challenge in converting spun yarns and fabrics into finished products. In this regard, ultrasound-assisted dyeing of regenerated bamboo fibers with reactive dyes is particularly important because of its greater process efficiency and resource-saving potential compared with conventional dyeing. Ultrasound-assisted dyeing of regenerated bamboo materials produces a 5-6 % higher color strength than the conventional method. Physical intensification of the dyeing process also reduces the dyeing temperature by 10 °C, the process duration by 15 min, and the consumption of salt and alkali by 10 g/L and 0.5-1.0 % based on fabric weight, respectively. These reductions improve the economic and environmental efficiency of bamboo-fiber dyeing [28].

Level and colorfast shades can also be obtained by dyeing regenerated bamboo fabric with reactive dyes in a 75 % ethanol solution. This method permits dyeing after desizing alone, without scouring and bleaching, thereby avoiding a reduction in fiber strength [29]. Another patented method involves enzymatic pretreatment of regenerated bamboo fibers before dyeing to improve the softness of the resulting fabric [30].

Pretreatment of regenerated bamboo fabric with formic acid solutions at concentrations of 1, 2, 3, 4, and 5 %, prepared from 98 % formic acid, enables the production of colorfast shades using vinyl sulfone (Remazol), bifunctional ME, and monochlorotriazine (Procion) reactive dyes [29]. Continuous processing of cotton fibers is also considered a suitable technology for dyeing cotton-regenerated bamboo blended textiles because it requires less energy and processing time, minimizes dye migration, and provides high-quality dyeing with good colorfastness [31, 32].

Materials and Methods

The characteristics of cotton yarn (Uzbekistan) and regenerated bamboo yarn (China) used as the research materials are presented in Table 1. The cotton yarn had a linear density of 18.5/2 tex, indicating a two-ply yarn produced by twisting together two single yarns, each with a linear density of 18.5 tex. Similarly, the regenerated bamboo yarn had a linear density of 20/2 tex, representing a two-ply yarn formed by twisting together two single yarns, each with a linear density of 20 tex.

Table 1. Quality characteristics of cotton and regenerated bamboo yarns

Quality characteristics	Cotton yarn	Regenerated bamboo yarn
Number of twists per meter	700	650
Linear density, tex	18.5/2	20/2
Tenacity, cN/tex	14.5	13.7
Elongation at break, %	8.7	12.3
Coefficient of variation of elongation at break, %	11	12

Cotton yarn with a linear density of 18.5/2 tex and a tenacity of 14.5 cN/tex and regenerated bamboo yarn with a linear density of 20/2 tex and a tenacity of 16.3 cN/tex were selected as the research materials. Reactive Red 224 ($C_{27}H_{19}Cl_2N_7Na_2O_8S_2$; molar mass: 750 g/mol) and Chemactive Navy Blue WB ($C_{22}H_{16}N_2Na_2O_{11}S_3$; molar mass: 626.54 g/mol) were used as reactive dyes.

Cotton yarn with a linear density of 18.5/2 tex was prepared for finishing using three different treatment methods.

Table 2. Treatment compositions and processing conditions for cotton yarn hanks

<table>
<tr><td colspan="3">Treatment formulations and procedures for cotton yarn hanks</td></tr>
<tr><td>Method 1</td><td>Method 2</td><td>Method 3</td></tr>
<tr><td>Sodium hydroxide: 10-100 g/L
Treatment temperature: 70, 80, 90, and 100 °C
Treatment duration: 45 min
Liquor ratio: 1:100</td><td>Sodium hydroxide: 1-20%
Treatment temperature: 25 ± 5 °C
Treatment duration: 1-15 min
Liquor ratio: 1:100</td><td>Sodium hydroxide: 225-300 g/L
Treatment temperature: 18 ± 2 °C
Treatment duration: 1-2 min
Liquor ratio: 1:15</td></tr>
<tr><td colspan="3">• Washing at 45 ± 5 °C for 10 min; liquor ratio: 1:100.
• Neutralization with acetic acid (10 g/L) at 30 ± 5 °C for 10 min; liquor ratio: 1:100.
• Washing at 45 ± 5 °C for 10 min; liquor ratio: 1:100.
• Final washing at 20 ± 2 °C for 10 min; liquor ratio: 1:100</td></tr>
</table>

Cotton yarns treated using the different methods were dyed with reactive dyes according to the following procedures.

1. Dyeing with Reactive Red 224

Dye bath composition and processing conditions:

1. Reactive Red 224: 2 % on the weight of the yarn;
2. NaCl: 50 g/L;
3. $Na_2CO_3$15 g/L;
4. Temperature: 40 °C;
5. Dyeing duration: 140 min.

Washing and neutralization:

1. Washing with water at 25 °C for 40 min;
2. Washing with hot water at 75 – 80 °C for 40 min;
3. Washing with surfactant solution (0.2 g/L) at 90-98 °C for 40 min;
4. Washing with hot water at 75 – 80 °C for 60 min;
5. Neutralization with CH_3COOH (0.5 g/L) at 50 °C for 10 min.

2. Dyeing with Chemactive Navy Blue WB

Dye bath composition and processing conditions:

1. Chemactive Navy Blue WB: 1 – 2 % on the weight of the yarn;
2. NaCl: 75 g/L;
3. Na_2CO_3: 20 g/L;
4. Temperature: 70 °C;
5. Dyeing duration: 140 min.

The samples were washed and neutralized under the same conditions as those described for Method 1.

Color coordinates indicate the position of a color along the red-green and yellow-blue axes of a selected color space. The CIE XYZ system serves as the basis for defining other color spaces. In the CIE L*a*b* color system, L*, a*, and b* are numerical parameters used to describe colors perceived by the human eye. L* represents lightness, whereas a* and b* represent the chromaticity coordinates. These parameters are commonly used for color evaluation, comparison, and quality control.

Results and Discussions

The proposed treatment methods were selected taking into account the changes occurring in the cellulose macromolecule and fiber morphology during alkaline treatment of cotton fibers. The concentrations of caustic alkali were expressed in g/L and in percent. In the batch scouring-bleaching process, depending on the treatment duration and temperature, the caustic alkali concentration in Method 1 was calculated in g/L relative to the volume of the treatment solution. In the continuous scouring-bleaching process, where treatment is carried out within a short period of time, the alkali concentration was expressed as a percentage relative to the mass of the fabric. In Method 3, the conventional mercerization technology was applied. The objective was to bring the sorption properties and morphology of cotton fibers closer to those of bamboo fibers by increasing the alkali concentration during scouring compared with the conventional method (Method 1), improving the mercerization process by replacing low-temperature treatment with treatment at room temperature and thereby reducing the alkali concentration (Method 2), and applying conventional mercerization (Method 3).

According to the first method, cotton yarn packages were prepared for finishing by a batch process. During the scouring-bleaching process, the effects of alkali concentration and treatment duration on the physical and mechanical properties and capillarity of the samples were investigated.

Combining mercerization with alkaline scouring is considered an effective method because both stages are carried out under alkaline conditions. Under the action of alkali, the naturally twisted ribbon-like structure of cotton fibers becomes more uniform; the fibers swell, their diameter increases, and the internal lumen of the fiber almost disappears. These external changes are associated with physical, chemical, physicochemical, and physicomechanical transformations of cellulose under the action of concentrated sodium hydroxide solutions [33]. The final product of these transformations is a new structural modification of cellulose-cellulose hydrate—which differs from native cellulose in its physical structure and physicochemical properties.

The changes in the breaking strength of cotton yarn at different alkali concentrations during the scouring-bleaching process can be explained by the compaction of its structure resulting from the removal of natural accompanying substances from the fiber (Fig. 1).

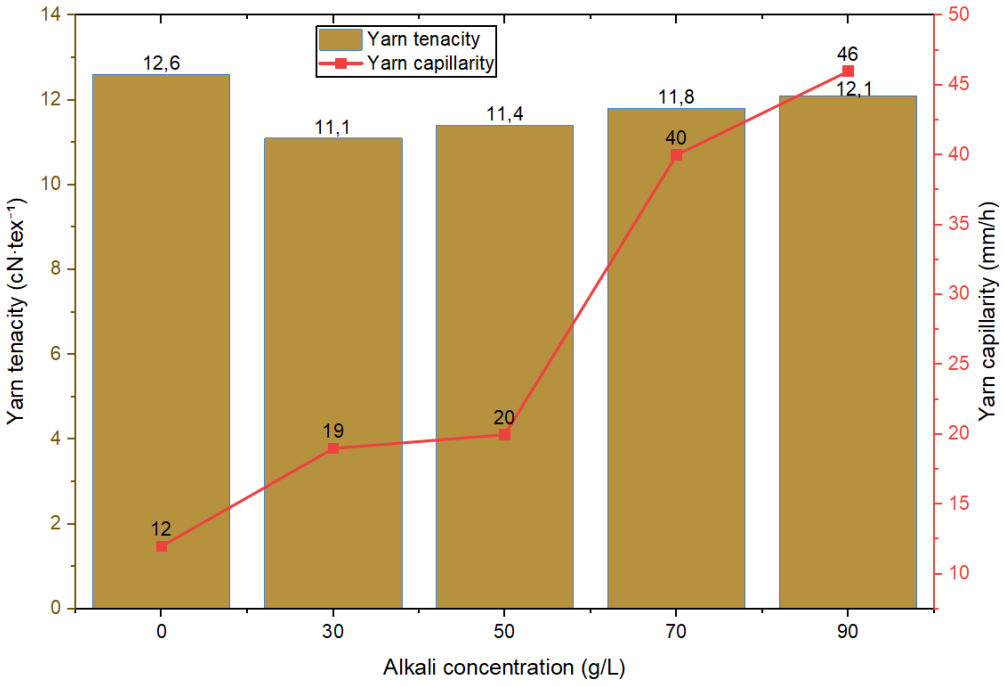


Figure 1. Effect of alkali concentration on yarn properties of yarn tenacity and yarn capillarity during scouring and bleaching

The breaking strength of the yarn scoured and bleached in a 30 g/L alkali solution at 100°C decreased by 12 %, while a further increase in alkali concentration resulted in a gradual increase in strength. However, after the scouring-bleaching process, the breaking strength of the samples remained lower than that of the untreated yarn by 9.6 %, 6.4 %, and 4.0 %, respectively, depending on the alkali concentration. Under these conditions, the capillarity of the yarn increased sharply and became almost twice as high as that of the bamboo yarn (Fig. 2). Therefore, in subsequent studies, the process was planned to be carried out at lower temperatures.

In conventional practice, cotton textile materials are purified from natural accompanying substances at a temperature of 100°C. In our study, the possibility of reducing the process temperature by increasing the alkali concentration was investigated (Table 3).

Table 3. Effect of alkali concentration and treatment temperature on yarn strength during scouring and bleaching

Treatment temperature (°C)	Yarn tenacity (cN/tex)				
	Alkali concentration (g/l)				
	-	30	50	70	90
70	12,5	15,5	15,1	14,3	13
80	12,5	15	14,8	13,7	13,2
90	12,5	11,2	11,6	12	12,4

Note: Treatment duration: 45 min.

When scouring and bleaching were carried out in concentrated sodium hydroxide solutions at 70 and 80 °C, yarn tenacity decreased as the alkali concentration increased. Nevertheless, compared with the untreated yarn, the tenacity values at the different concentrations were higher by 4.0 and 5.6 %, 14.4 and 9.6 %, 20.8 and 18.4 %, and 24.0 and 20.0 % at 70 and 80 °C, respectively. At 90 °C, the tenacity of the samples treated at all alkali concentrations was lower than that of the untreated yarn. However, it increased progressively with increasing alkali concentration.

The higher tenacity of yarn samples treated with concentrated alkali compared with those treated at lower concentrations is associated with the hydration of sodium hydroxide ions, their penetration into the cellulose fiber structure, and the resulting increase in fiber swelling. At low sodium hydroxide concentrations, the large diameter of the hydrated ions restricts their penetration into the highly ordered crystalline regions of the fibers. However, hydrated alkali ions can penetrate the primary wall of cellulose, where the macromolecules have relatively lower degrees of polymerization and molecular weights and the crystalline regions are less ordered.

At low alkali concentrations, hydrated sodium ions (Na^+) have a diameter of approximately 0.72 – 0.76 nm. Hydroxide ions (OH^-) are smaller and are comparable in size to water molecules. In dilute solutions, Na^+ ions form a strongly hydrated shell consisting of several layers of water molecules, resulting in a relatively large effective diameter. As the alkali concentration increases, the limited availability of free water causes partial dehydration and reduces the radius of the hydrated ions, facilitating their penetration into the internal fiber structure.

Therefore, although treatment with 30 g/L alkali reduced yarn tenacity compared with the untreated yarn, the tenacity increased progressively with alkali concentration at treatment temperatures of 90 and 100 °C. The effects of scouring and bleaching temperature and alkali concentration on yarn capillarity are presented in Figure 2.

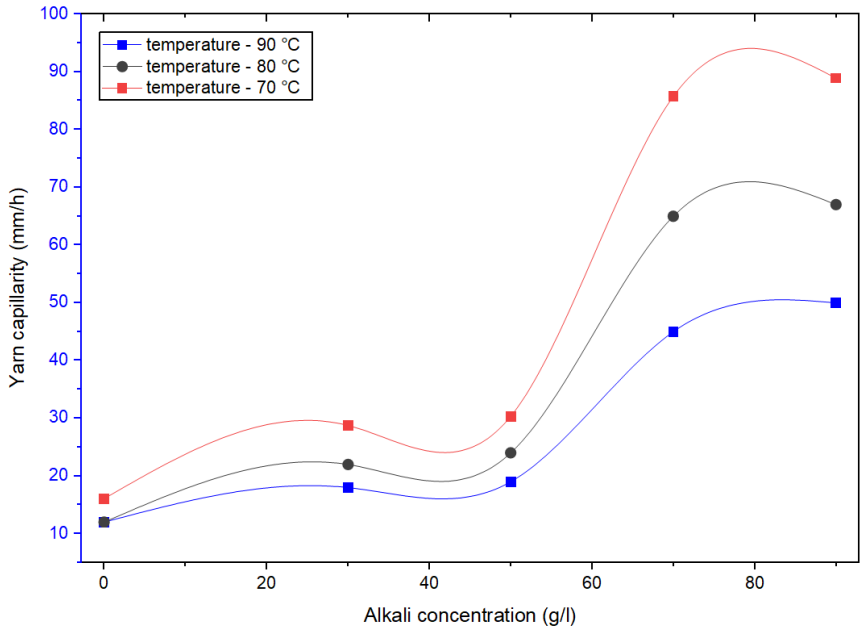


Figure 2. Dependence of yarn capillarity on scouring and bleaching temperature and alkali concentration

Although yarn tenacity increased with treatment temperature depending on the alkali concentration, the relatively low capillarity of the samples indicates that cellulose macromolecules underwent a certain degree of degradation at lower temperatures. This may be associated with conformational changes in the cellulose chains. Increasing the alkali concentration above 70 g/L produced almost no further change at any of the temperatures studied.

Furthermore, the capillarity of the samples treated under these conditions was almost three times higher than that of regenerated bamboo yarn, making it difficult to obtain the same color shade in the two yarns. The results showed that the capillarity of cotton yarn approached that of regenerated bamboo yarn when scouring and bleaching were conducted either at 80 °C with 50 g/L alkali or at 70 °C with 30 g/L alkali. These samples were subsequently dyed to compare their colorimetric characteristics with those of regenerated bamboo yarn.

Although the temperature of cotton-yarn scouring and bleaching was reduced by 20 – 30 °C, the 10- to 15-fold increase in alkali concentration creates challenges related to process economics, wastewater treatment, and the recovery of concentrated spent alkali solutions. Considering these limitations, the next stage of the study involved further increasing the alkali concentration while conducting the treatment at room temperature. This approach was based on changes in the morphology and sorption properties of cellulose treated with concentrated alkali at low temperatures.

In Method 2, cotton yarn samples that had previously been scoured and bleached under alkaline conditions were treated at room temperature with 1, 10, and 15 % sodium hydroxide solutions. The effect of treatment duration on yarn tenacity was then investigated (Table 4).

Table 4. Dependence of cotton yarn tenacity on alkaline treatment conditions

Sodium hydroxide concentration (%)	**Cotton yarn tenacity (cN/tex)**			
	Treatment duration (min)			
	1	**5**	**10**	**15**
5	14,5	14,5	15,3	14

Sodium hydroxide concentration (%)	Cotton yarn tenacity (cN/tex)			
	Treatment duration (min)			
	1	5	10	15
10	15,1	15,1	14,9	13
15	16	15,1	15	11

Note: Treatment temperature: 25 ± 5 °C. The tenacity of the untreated yarn was 12.5 cN/tex.

The data show that when treatment was carried out at room temperature for 1 min, yarn tenacity increased progressively as the alkali concentration was raised to 15 %. Treatment with a 5 % alkali solution increased tenacity by 16 %, whereas increasing the concentration to 15 % produced a 28 % increase in cotton yarn tenacity. When the process was conducted for 5 min using 5 and 10 % alkali solutions, the tenacity values remained almost unchanged compared with those of the samples treated for 1 min. At an alkali concentration of 15 %, however, yarn tenacity was 20.8 % higher than that of the untreated yarn.

The experimental results presented in the table demonstrate the dependence of yarn tenacity on treatment duration. Treatment with 5 % sodium hydroxide for 10 min increased yarn tenacity by 22.4 %. This may be associated with the removal of low-degree-of-polymerization fractions from the cotton fiber under these conditions.

Treatment at room temperature with different alkali concentrations for different durations reduced the proportion of amorphous regions and increased the volume of crystalline regions within the fibers. Yarn shrinkage and thickening of the fiber walls consequently increased their tenacity. This process results in the formation of a specific hydrated compound consisting of cellulose and sodium hydroxide ($C_6H_{10}O_5 \cdot NaOH$). During washing, this compound decomposes, the alkali is removed from the system, and cellulose is regenerated in the form of hydrated cellulose ($C_6H_{10}O_5 \cdot H_2O$). This transformation allows the modified structure and properties to be retained permanently.

The decrease in mechanical properties caused by structural changes during treatment at the same concentration but for different durations is supported by the results obtained after 15 min. Although treatment with 5 and 10 % sodium hydroxide for 15 min did not reduce yarn tenacity below that of the initial sample, the values were lower than those obtained at treatment times of up to 10 min. Treatment with 15 % sodium hydroxide at room temperature for 15 min reduced cotton yarn tenacity by 12 %, from 12.5 to 11.0 cN/tex. This decrease may be attributed to the increasing involvement of hydroxyl groups in exchange reactions within the cellulose macromolecules during prolonged exposure to the alkaline solution, which adversely affects the mechanical properties of the yarn. Furthermore, the removal of non-cellulosic substances during treatment at a relatively high concentration for an extended period may alter the orientation and ordering of the macromolecules, thereby reducing fiber strength.

The effect of alkaline treatment conditions on yarn sorption properties was evaluated by determining capillarity. Five specimens were prepared from each yarn treated at room temperature with sodium hydroxide solutions of different concentrations and for different durations. Their capillarity was assessed by measuring the rise of a potassium dichromate solution along the yarn over 60 min (Table 5). A 2 g weight was attached to the end of each yarn specimen immersed in the potassium dichromate solution.

Table 5. Dependence of cotton yarn capillarity on alkaline treatment conditions

Sodium hydroxide concentration (%)	Cotton yarn capillarity (mm/h)			
	Treatment duration (min)			
	1	5	10	15
5	12	12	16	17
10	14	14	18	20
15	17	19	22	27

Note: Treatment temperature: 25 ± 5 °C. The capillarity of the untreated yarn was 12 mm/h.

Depending on the alkali concentration and treatment duration, the capillarity of the cotton yarn increased to a certain extent (12–27 mm/h), indicating an improvement in its sorption properties. Microscopic analysis showed that, as a result of this treatment, the fibrous structure of the cotton yarn changed from a ribbon-like form to a more cylindrical shape, confirming morphological changes in the fiber (Fig. 3).

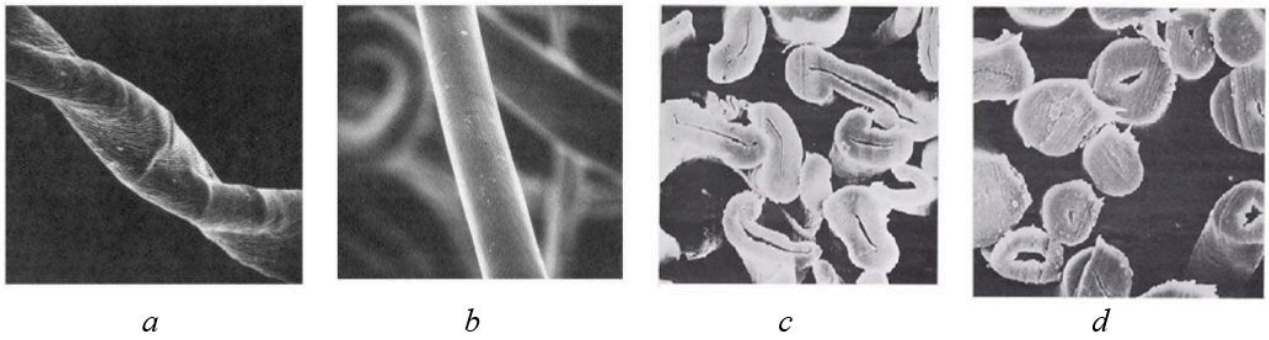


Figure 3. Longitudinal (a, b) and cross-sectional (c, d) scanning electron microscopy (SEM) images of the fibers at 500× magnification: (a, c) cotton and (b, d) mercerized cotton

The SEM images show that alkaline treatment transformed cotton fibers from a twisted, ribbon-like form into a smoother, more cylindrical structure. The capillarity and morphology [34] of the samples treated with 10 % sodium hydroxide for 5 min were found to be similar to those of regenerated bamboo yarn, which had a capillarity of 18 – 20 mm/h. The samples treated under these conditions were therefore selected for subsequent comparison with the colorimetric characteristics of regenerated bamboo yarn.

Mercerization improves the luster, absorbency, dyeability, and strength of fabrics. When cellulose is treated with a concentrated sodium hydroxide solution and subsequently washed with water, it is converted first into alkali cellulose and then into hydrated cellulose. These transformations occur because of changes in the morphological and supramolecular structures of cellulose.

The scoured and bleached yarns were held under tension and immersed for 5 min in a sodium hydroxide solution with a concentration of 225 – 300 g/L at 15 – 18 °C. The capillarity and mechanical strength of the yarn samples after mercerization are presented in Table 6.

Table 6. Quality characteristics of mercerized cotton yarn

Quality characteristics	Unit of measurement	Parameter values
Yarn capillarity	mm/h	22

Quality characteristics	Unit of measure-ment	Parameter values
Whiteness index	%	87,76
Yarn tenacity	cN/tex	18,2

The experimental results presented in the table show that mercerization can bring the quality characteristics of conventionally pretreated cotton yarn, particularly its capillarity, closer to the sorption properties of regenerated bamboo yarn. The higher tenacity of the mercerized yarn compared with the unmercerized sample indicates that the concentrated alkali did not penetrate deeply into the fiber structure during the short, low-temperature treatment and that the main transformation occurred primarily within the fiber's primary wall. The mercerized cotton yarn samples were selected for subsequent dyeing and comparative analysis with the colorimetric characteristics of regenerated bamboo yarn.

Results and Discussion

Cotton yarns treated using the different methods were dyed with Reactive Red 224 and Chemactive Navy Blue WB reactive dyes. The colorimetric properties of the dyed samples were measured at the scientific laboratory of the Kor-Uz Textile Technopark using an X-Rite Ci7800 spectrocolorimeter in accordance with ISO 105-J01 (Figure 4).

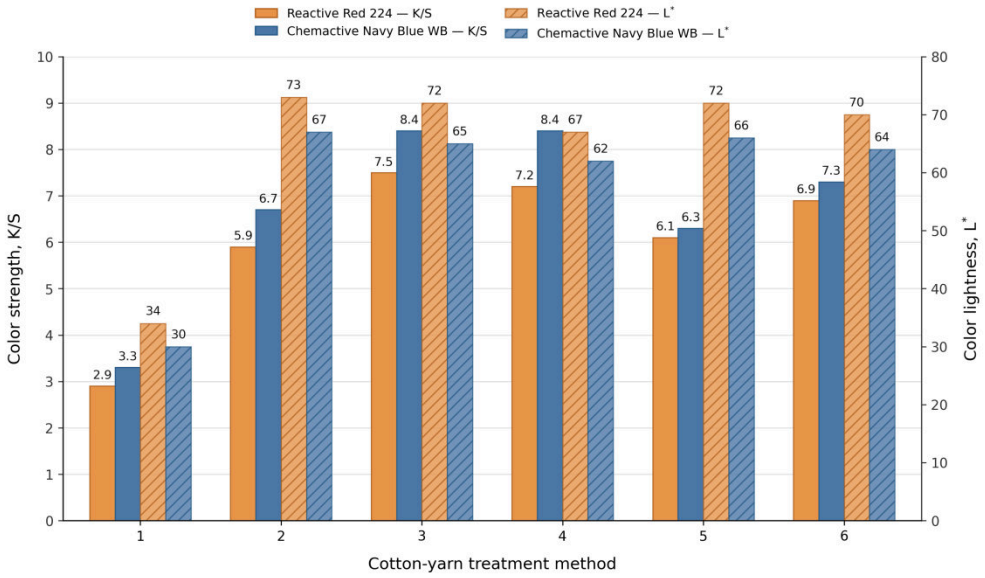


Figure 4. Dependence of color strength (a) and color lightness (b) on the cotton-yarn treatment method

The color characteristics of the samples were evaluated using the CIE XYZ, CIE L*a*b*, and RGB color spaces. The experimental results showed that the color strength of conventionally pretreated cotton yarn was 52.6 % lower than that of regenerated bamboo yarn when dyed with Reactive Red 224 and 52.3 % lower when dyed with Chemactive Navy Blue WB.

For Reactive Red 224, the color strength closest to that of regenerated bamboo yarn was obtained for cotton yarn scoured and bleached at 70 °C in a solution containing 30 g/L alkali. For Chemactive Navy Blue WB, the closest values were obtained for cotton yarn scoured and bleached and subsequently treated with a 10 % alkaline solution at room temperature for 5 min, as well as for

cotton yarn scoured and bleached at 70 °C using 30 g/L alkali. Among the modified samples dyed with the two dyes, the greatest differences from regenerated bamboo yarn were observed for scoured, bleached, and mercerized cotton yarn, amounting to 28.1 and 26.2 %, respectively. This may be explained by the conversion of cellulose I into cellulose II during treatment with highly concentrated sodium hydroxide.

The flat, ribbon-like structure of conventionally pretreated cotton fibers resulted in color-lightness values that were 53.9 % lower for the red shade and 56.6 % lower for the blue shade than those of regenerated bamboo yarn. Alkaline treatment using the different methods altered the cotton-fiber structure, smoothed the fiber surface, and, in some samples, transformed the flattened fiber into a more cylindrical form. Consequently, the red-shade lightness values of samples 3–6 differed from that of regenerated bamboo yarn by only 1.9, 8.5, 0.9, and 4.1 %, respectively. For the blue shade, the corresponding differences were 2.8, 7.8, 1.6, and 4.6 %.

The position of each color along the red–green and yellow–blue axes is expressed by its color coordinates (Table 7).

Table 7. Color coordinates of the samples

Samples (as shown in Figure 6)	Color coordinates			
	Reactive red 224		Chemactive Navy Blue WB	
	a^*	b^*	a^*	b^*
1	26,46	-0,45	5,54	5,54
2	25,38	2,39	3,70	3,70
3	21,18	2,66	1,94	1,94
4	19,43	4,80	0,40	0,40
5	19,87	7,02	-0,22	-3,62
6	15,86	6,07	-1,04	-1,19

Note: *1-cotton yarn conventionally scoured and bleached; 2-regenerated bamboo yarn; 3-scoured, bleached, and mercerized cotton yarn; 4-cotton yarn scoured and bleached at 80 °C in a solution containing 50 g/L alkali; 5-cotton yarn scoured and bleached at 70 °C in a solution containing 30 g/L alkali; and 6-cotton yarn scoured and bleached and subsequently treated with a 10 % alkaline solution at room temperature for 5 min.*

The results presented in the table show that the positions of the dyed samples within the CIE L*a*b* color space changed depending on the treatment method. Variations in the color coordinates of the samples affected their chroma and hue (Table 8).

Table 8. Dependence of chroma and hue on the treatment method

Samples (as shown in Figure 5)	Colorimetric parameter			
	Reactive red 224		Chemactive Navy Blue WB	
	Color saturation, (S)	Color hue, (h)	Color saturation, (S)	Color hue, (h)
1	24,47	358,95	10,02	303,58
2	25,49	5,37	8,12	297,12
3	21,35	7,15	6,24	288,13
4	20,02	13,87	5,14	274,44
5	21,07	19,44	3,63	266,56

Samples (as shown in Figure 5)	Colorimetric parameter			
	Reactive red 224		Chemactive Navy Blue WB	
	Color saturation, (S)	Color hue, (h)	Color saturation, (S)	Color hue, (h)
6	16,98	20,96	1,58	228,91

Note: 1-cotton yarn conventionally scoured and bleached; 2-regenerated bamboo yarn; 3-scoured, bleached, and mercerized cotton yarn; 4-cotton yarn scoured and bleached at 80 °C in a solution containing 50 g/L alkali; 5-cotton yarn scoured and bleached at 70 °C in a solution containing 30 g/L alkali; and 6-cotton yarn scoured and bleached and subsequently treated with a 10 % alkaline solution at room temperature for 5 min.

The changes in color saturation and hue resulting from the sequence of alkaline treatments applied to the cotton yarn samples were related, first, to changes in fiber morphology and, second, to the external and internal diffusion of the dye into the fiber, its sorption onto the fiber surface, and its subsequent fixation during dyeing. For samples 3 – 6 dyed with Reactive Red 224, the differences in color saturation were 0.7, 1.08, 0.8, and 0.5 %, respectively. For the samples dyed with Chemactive Navy Blue WB, the corresponding values were 0.3, 0.4, 0.6, and 0.8 %.

A visual comparison of the colorimetric characteristics of the samples is presented in Figure 5.

Figure 5. Samples dyed with Reactive Red 224: 1-cotton; 2-bamboo; 3-mercerized cotton; 4 and 5-cotton yarn samples treated for 45 min with alkali solutions containing 50 g/L at 80 °C and 30 g/L at 70 °C, respectively; and 6-cotton yarn treated with a 10% alkaline solution at room temperature for 5 min

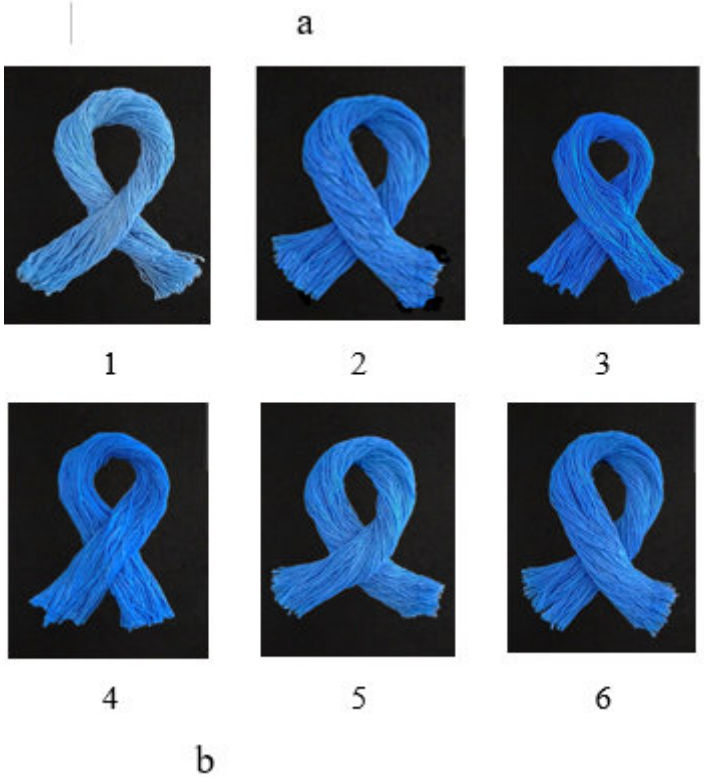


Figure 6. Samples dyed with Chemactive Navy Blue WB: 1-cotton; 2-bamboo; 3-mercerized cotton;4 and 5-cotton yarn samples treated for 45 min with alkali solutions containing 50 g/L at 80 °C and 30 g/L at 70 °C, respectively; and 6-cotton yarn treated with a 10% alkaline solution at room temperature for 5 min

Conclusion

Based on the experimental results obtained, in order to achieve the same coloristic quality characteristics for cotton and bamboo yarns in blended fabrics, it is recommended to scour and bleach the cotton yarn at 70°C for 45 min in an alkali solution with a concentration of 30 g/L, or to treat conventionally prepared cotton yarn with a 10 % caustic alkali solution at room temperature for 5 min.

By applying a short-term treatment of conventionally scoured and bleached cotton yarn with a 10 % alkali solution at room temperature for 5 min, or by scouring and bleaching raw cotton yarn at 70°C for 45 min in a 30 g/L alkali solution, the color shade, brightness, and saturation of the cotton yarn were brought as close as possible to those of regenerated bamboo yarn, thereby achieving a balance in their chemical reactivity. Due to changes in the morphology of cotton fibers under the action of alkali, the capillarity of the yarn increased to a certain extent (12–27 mm/h), depending on the alkali concentration and treatment duration.

The color intensity of cotton yarn prepared for finishing by the conventional method was 52.6 % lower than that of regenerated bamboo yarn when dyed with Reactive Red 224 and 52.3 % lower when dyed with Chemactive Navy Blue WB. For the samples dyed with both dyes, the greatest difference compared with regenerated bamboo yarn was observed in the scoured, bleached, and mercerized cotton yarn samples, amounting to 28.1 % and 26.2 %, respectively. When dyed

with Reactive Red 224, the color saturation values of samples 3–6 were 0.7 %, 1.08 %, 0.8 %, and 0.5 %, respectively, whereas for Chemactive Navy Blue WB they were 0.3 %, 0.4 %, 0.6 %, and 0.8 %, respectively.

References

1. Dong C. Review of natural fibre-reinforced hybrid composites // Journal of Reinforced Plastics and Composites. – 2018. – Vol. 37. – P. 331–348. – DOI: 10.1177/073168441774536].
2. Kranthi K.R., Stone G.D. Long-term impacts of Bt cotton in India // Nature plants. – 2020. – Vol. 6. – P. 188–196. – DOI: 10.1038/s41477-020-0615-5].
3. Shabbir M.S., Yaqoob N. The impact of technological advancement on total factor productivity of cotton: a comparative analysis between Pakistan and India // Journal of Economic Structures. – 2019. – Vol. 8. – DOI: 10.1186/s40008-019-0160-4].
4. Khudayberdieva D.B. & Buriev, Zabardast & Darmonov M.M. & Akhmedova, M.Sh & Mamadjanova S.A. Comprehensive Assessment of the Physical and Mechanical Properties of Cotton-Silk Blends from New Varieties of Cotton Fiber // Proceedings of Higher Education Institutions. Textile Industry Technology. – 2021. – P. 85–90. – DOI: 10.47367/0021-3497_2021_3_85].
5. Nabieva I. et al. Preparation for the dyeing of blended yarns made from cotton and PAN fibres // International Textile Bulletin. – 2004. – Vol. 50. – P. 64–65.
6. Yu Y., Zhu R., Wu B.; Hu, Y'a.; Yu, W. Fabrication, material properties, and application of regenerated bamboo scrimber // Wood Sci. Technol. – 2015. – Vol. 49. – P. 83–98.
7. Thomas V., Liu W. Assessment of Alternative Fibers for Pulp Production Public Version // Available at SSRN 4923477. – 2013.
8. Bahrum P.R., Amanda J.T. Bahrum P R, Amanda J T. Strategies of the Online Regenerated bamboo Viscose Clothing and Textiles Retailers // Curr Trends Fashion Technol Textile Eng. – 2021. – Vol. 7. – P. 49–58. – DOI: 10.19080/CTFTTE.
9. Li L.J., Wang, G., Cheng H.T. & Han X.J. Evaluation of properties of natural regenerated bamboo fiber for application in summer textiles // Journal of Fiber Bioengineering and Informatics. – 2010. – Vol. 3. – P. 94–99. – DOI: 10.3993/jfbi09201006].
10. Majumdar A. et al. Properties of ring-spun yarns made from cotton and regenerated regenerated bamboo fibres // Indian Journal of Fibre and Textile Research. – 2011. – Vol. 36.
11. Amjad A.I., Kumar R. Effect of eco-friendly regenerated bamboo rayon, lyocell, and seacell fibres on the properties of blended knitted melange fabrics // Fibers and Polymers. – 2023. – Vol. 24. – P. 1845–1858.
12. Basit A. et al. The mechanical and comfort properties of viscose with cotton and regenerated fibers blended woven fabrics // Materials Science. – 2018. – Vol. 24. – P. 230–235.
13. Bassyouni F.A. et al. Characterization of new coloured materials on different fabrics and application on wool fabrics to comfort and ultraviolet protective garment // Egyptian Journal of Chemistry. – 2020. – Vol. 63. – P. 2751–2261. – DOI: 10.21608/ejchem.2020.19849.2199].

14. Agag O.A.G.A.N., Radwan G.A.A.H., Hassan H., Hassan N.A.A.M. Ola Ali Gamil Ahmed Nasr Agag, Gamal Abd Al Hamid Radwan, Hany Hassan, Nahla Abd Al Mohsen Hassan. Enhancing Color Fastness in Upholstery Fabrics // A Comprehensive Analysis of Multifunctional Properties in Woven Fabrics with Varied Fiber Blend Ratios. – 2024. – Vol. 3, No. 2. – P. 7–30.
15. Prakash C., Ramakrishnan G., Koushik C.V. Effect of blend ratio on the quality characteristics of bamboo/cotton blended ring spun yarn // Fibres & Textiles in Eastern Europe. – 2011. – Vol. 19. – P. 38–40.
16. Rathod A. Analysis of physical characteristics of regenerated bamboo fabrics // International Journal of Research in Engineering and Technology. – 2014. – P. 21–25.
17. Kan C.W., Lam P.S. Effect of Low Temperature Plasma Treatment on the Dyeability of Regenerated Bamboo/Cotton Blended Fabrics // AATCC Journal of Research. – 2017. – Vol. 4. – P. 20–26. – DOI: 10.14504/ajr].
18. Mady N.I., Atiha S.M. Improving the Fastness and Antimicrobial Properties of Dyed Regenerated bamboo and Bamboo/Cotton Blend with Eco-Friendly Materials // International Design Journal. – 2018. – Vol. 8. – P. 303–310.
19. Ovi F.I., Sajjad R.N. Optimization of dyeing conditions for bamboo-cotton blended fabrics: A study on temperature sensitivity, chemical and mechanical properties, and environmental performance // Advances in Regenerated bamboo Science. – 2025.
20. Gun A.D., Tiber B. Color, color fastness and abrasion properties of 50/50 bamboo/cotton blended plain knitted fabrics in three different stitch lengths // Textile research journal. – 1915. – Vol. 81. – P. 1903–1915. – DOI: 10.1177/00.
21. Noh Y.J. The Study on Natural Dyeing of Cationized Bamboo-Cotton Blended Fabrics Using Gardenia Dye // The Korean Fashion and Textile Research Journal. – 2025. – Vol. 27. – P. 255–262.
22. Filiz Sekerden. Investigation on the Unevenness, Tenacity and Elongation Properties of Bamboo/Cotton Blended Yarns // Fibres & Textiles in Eastern Europe. – 2011. – Vol. 19.
23. Asmare F.W., Liu X., Qiao G., Li R., Babu K.M., Wu D. Fisseha Wubneh Asmare, Xiaodong Liu, Guanfang Qiao, Ruixia Li, Murugesh Babu K., Dacheng Wu. Production and properties of natural bamboo-cotton blended yarns // Advances in Regenerated bamboo Science. – 2025. – Vol. 11. – DOI: 10.1016/j.bamboo.
24. Hashem A., Farag S. Cotton bleaching: Evolution, current practices, and future perspectives // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2025. – No. 8. – P. 1–23. – DOI: 10.1007/s00170-025-16185-4].
25. Buschle-Diller G. et al. Effects of scouring with enzymes, organic solvents, and caustic soda on the properties of hydrogen peroxide bleached cotton yarn // Textile Research Journal. – 1998. – Vol. 68. – P. 920–929.
26. Küster L. et al. Küster L. et al. Performance of low-temperature bleaching techniques for cotton fabrics using hydrogen peroxide activators // ACS omega. – 2025. – Vol. 10. – P. 28167–28177.

27. Gürsoy N. Ç. et al. Cationic Bleach Activators for Improving Cotton Bleaching // AATCC review. – 2004. – Vol. 4.
28. Larik S.A., Khatri A., Ali S., Kim S.H. Batchwise dyeing of regenerated bamboo cellulose fabric with reactive dye using ultrasonic energy // Ultrason. Sonochem. – 2015. – Vol. 24. – P. 178–183. – DOI: 10.1016/j.ultsonch].
29. Xinshijia Textile Products (Nantong) Co., Ltd. 一种竹纤维面料染整工艺 Regenerated bamboo fiber fabric dyeing and finishing process // patent CN105887514A, China. – 2016. – No. 201610327635.
30. Taicang International Textile Printing and Dyeing Co., Ltd. A dyeing and finishing method for regenerated bamboo fiber: patent CN105064079A, China. – Application No. 201510587404.X, 2015.
31. Ioelovich M., Leykin A. Study of sorption properties of cellulose and its derivatives // Bio Res. – 2011. – Vol. 6. – P. 178–195.
32. Liang Suzhen. Study on Dyeing Process of Regenerated bamboo Pulp Fiber Fabric with Pomegranate-peel Dye // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1790. – DOI: 10.1088/1742–6596/1790/1/012001].
33. Кричевский Г.Е. Химическая технология текстильных материалов. Учебник для ВУЗов. в 3-х т. Т.1 – М., 2000. – С.436.
34. Makhfuza Khasanova, Iroda Nabiyeva, Nargiza Norkulova, Elena Sashina. Current state of regenerated bamboo fiber application in the textile industry // AIP Conference Proceedings. – 2025. – Vol. 3304. – DOI: 10.1063/5.0269599].

Received: 22.10.2026
Accepted: 29.10.2026
Published: 28.11.2026

УДК 677.31.017+ 004.932

Possibilities of measuring wool fibre diameter from smartphone images

Valiyeva Zulfiya Fakhritdinovna
Associate Professor
at the Tashkent Institute of Textile and Light Industry
Uzbekistan, Tashkent
E-mail: aislom938@gmail.com

Khaydarov Ulugbek Panjiyevich
Associate Professor
at the Tashkent Institute of Textile and Light Industry
Uzbekistan, Tashkent

Sa'dullayev Shakhriyor Dilshod o'g'li
Master's student at the Tashkent Institute of Textile and Light Industry
Uzbekistan, Tashkent

Возможности измерения диаметра шерстяного волокна по изображениям со смартфона

Валиева Зульфия Фахритдиновна
доц.
Ташкентский институт текстильной и лёгкой промышленности
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Хайдаров Улугбек Панджиевич
доц.
Ташкентский институт текстильной и лёгкой промышленности
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Саъдуллаев Шахриёр Дилшод ўғли
магистрант
Ташкентский институт текстильной и лёгкой промышленности
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Abstract

This article examines whether a smartphone equipped with an inexpensive macro lens can be used to measure wool fibre diameter (fineness). Existing laboratory and digital measurement methods, the physical limitations of smartphone optics and sensors, potential sources of systematic

Библиографическое описание: Валиева З.Ф., Хайдаров У.П., Саъдуллаев Ш.Д.Ў. Возможности измерения диаметра шерстяного волокна по изображениям со смартфона // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23643

For citation: Valiyeva Z.F., Khaydarov U.P., Sa'dullayev S.D.O. Possibilities of measuring wool fibre diameter from smartphone images // Universum: Technical Sciences : electronic scientific journal. 2026. No. 11(152). Available at: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23643

and random error, and the requirements for calibration and statistical reliability are reviewed. The analysis indicates that measuring fibre diameter from smartphone images is physically feasible; however, achievable accuracy depends primarily on optical resolution, illumination, image-processing algorithms, and sample size rather than on the number of megapixels alone. The proposed approach may be useful for preliminary wool assessment and fineness classification on farms and at collection points, provided that it is validated against certified reference samples. Under the assumptions of a coefficient of variation of approximately 22 %, a normal distribution of fibre diameters, and a systematic error of approximately 0.5 μm after calibration, calculations indicate that measuring 100 fibres may provide a random-error component of approximately ±1 μm for samples with a mean diameter of up to 23 μm. Increasing the sample size to 300 fibres reduces the estimated combined standard uncertainty only modestly. Samples close to class boundaries require additional measurements or verification using a reference method. This study is a theoretical analysis based on published literature and calculations; no experimental smartphone measurements are reported.

Аннотация

В данной статье оценивается, может ли смартфон, оснащённый недорогой макролинзой, служить инструментом для измерения диаметра шерстяного волокна (тонины). Рассмотрены существующие лабораторные и цифровые методы, физические ограничения оптики и сенсоров смартфона, источники систематической и случайной ошибки, а также требования к статистике и калибровке. Показано, что диаметр волокна в принципе может быть измерен по изображению со смартфона, однако достижимая точность определяется не числом мегапикселей, а разрешающей способностью линзы, условиями освещения, алгоритмом измерения ширины волокна и объёмом выборки. Метод признан перспективным для быстрой оценки и отнесения шерсти к классам тонины на ферме и в пунктах приёмки; замена сертифицированных приборов возможна только после валидации на сертифицированных эталонных образцах. Оценено, при указанных допущениях (CV ≈ 22 %, нормальное распределение, систематическая ошибка ≈ 0,5 мкм после калибровки), что для отнесения шерсти к классу тонины при компоненте случайной ошибки ±1 мкм достаточно измерить не менее 100 волокон (при средней тонине до ≈ 23 мкм), тогда как увеличение выборки до 300 волокон снижает суммарную неопределённость лишь примерно на 0,1 мкм; для пограничных образцов предлагается последовательное добавление волокон. Статья представляет собой теоретический анализ, основанный на опубликованных данных и расчётах; экспериментальные измерения со смартфона не сообщаются.

Keywords: wool fineness, fibre diameter, computer vision, smartphone, macro lens, calibration, validation.

Ключевые слова: тонина шерсти, диаметр волокна, компьютерное зрение, смартфон, макролинза, калибровка, валидация.

Introduction

Fineness, i.e. the mean fibre diameter and its spread, is the main indicator determining the commercial value of wool, its spinning properties and its end use. Classification of raw wool and pricing rely on values in micrometres, and adjacent classes differ by only 1–2 μm (exact class boundaries depend on the classification system used). Any new method must therefore achieve an error of a few percent; otherwise it cannot distinguish between classes. Accuracy is precisely the central question of this article.

Methods of measuring fibre diameter

The reference method remains measurement with a projection microscope: fibre snippets are projected onto a screen and the diameter of several hundred fibres is read off (ISO 137, IWTO-8, ASTM D2130) [5]. The method is labour-intensive and operator-dependent. For comparison, in a study by Indian researchers a computerised projection microscope with image analysis gave a lower standard deviation and coefficient of variation than a conventional microscope and produced results faster with less labour, although the mean values of the two methods differed significantly at the 5 % level [2].

Automatic instruments are used for commercial lots: OFDA (fibre image analysis, IWTO-47), laser systems such as the Sirolan Laserscan (IWTO-12), and the Airflow method (IWTO-6). A telling example of the digital approach is the FIBER-EC system, built around a camera, a motorised stage and fibre-edge detection algorithms; after calibration against standard wool tops it showed confidence limits comparable to the OFDA 2000 and Sirolan Laserscan [4]. This confirms that automatic image-based measurement of diameter is feasible in principle, while also showing that high accuracy rests on stable optics, controlled illumination and calibration against reference samples. The diameter and scale of cashmere fibres have also been measured by computer image analysis [3].

The methods differ in what physical quantity they actually measure. Projection and image-analysis methods (the projection microscope, OFDA and the computer-vision method considered here) determine the geometric width of the fibre projection directly and therefore yield the whole distribution of diameters. The Sirolan Laserscan also measures individual fibres, but works with snippets about 2 mm long, whose width is derived from the interaction of each snippet with a scanning laser beam. The Airflow method is indirect: the resistance of a compressed fibre plug to an air stream depends on the specific surface of the fibres and hence, for a given plug mass and packing, on the mean diameter; this is why it provides only a mean value and is sensitive to medullation and to the mass and density of the plug. Acoustic methods developed by the authors' group [6–8] are likewise indirect, and it has been shown that the accuracy of such a device depends on the mass of the sample [6]. The idea of using a smartphone for on-farm measurement of micron, colour and crimp is also being pursued in industry projects [1]. The main features of the methods are summarised in Table 1.

Table 1. Comparison of methods for measuring wool fibre diameter

Method	Principle	Characteristics
Projection microscope	Manual reading of diameter on a projected image	Reference method; labour-intensive, operator-dependent
OFDA / Sirolan Laserscan	Automatic image analysis / laser scanning of snippets	Fast, certified; expensive stationary equipment
Airflow	Resistance to airflow through a sample plug	Gives the mean only, no distribution; sensitive to contaminants and medullation
Smartphone + macro lens	Imaging of fibres, computer vision	Cheap and portable; accuracy depends on optics and calibration

Optics and sensor resolution

In transmitted light, wool fibres of different fineness appear as elongated bands of different width. The width varies from fibre to fibre and along a single fibre, and coarse fibres show a medulla as a dark central band, because the air-filled channel scatters and refracts the transmitted light strongly. The refractive index of keratin is about 1.55, so a fibre mounted in air acts as a small cylindrical lens: light is refracted at its boundary, and the apparent edge consists of a bright halo (the Becke line) next to a dark rim, the position of which relative to the true geometric boundary depends on focus and illumination. Mounting the fibres in an immersion liquid with a refractive index close to that of the fibre reduces this effect, but complicates the procedure in field conditions.

A typical 12-megapixel smartphone sensor has a pixel size of about 1–1.4 μm. If the optical magnification of the macro lens at the sensor is M, the pixel size in the object plane is p/M. At M = 10 this is about 0.14 μm per pixel, so a fibre 20 μm in diameter is sampled by roughly 140 pixels across, which is more than sufficient. The bottleneck is therefore not the sensor but the optics.

Sampling theory sets a lower bound on the useful magnification. According to the Nyquist–Shannon criterion, the smallest resolvable detail must be sampled by at least two pixels, so the pixel size in the object plane, p/M, should not exceed half of the resolution limit d of the optics, i.e. $M \geq 2p/d$. For $p \approx 1.2$ μm and the resolution limits given below this corresponds to a magnification of the order of 1–3 (about 0.9 at NA = 0.10, 2.2 at NA = 0.25 and 3.4 at NA = 0.40). A higher magnification adds no information but reduces the field of view: for a sensor width of 5–6 mm the field of view is about 2 mm wide at M = 3 and only 0.5–0.6 mm at M = 10, so fewer fibres fall into one frame. Since the statistics of the measurement depend on the number of fibres, a lens with a moderate magnification and a larger numerical aperture is more valuable than a lens with a high nominal magnification and a small numerical aperture.

Resolving power by the Abbe criterion is estimated as $d \approx \lambda/(2 \cdot NA)$. For $\lambda = 550$ nm the values are given Table 2. Cheap clip-on macro lenses usually have a small numerical aperture, and edge blur of 1–3 μm is realistic for them. For a 20 μm fibre this means an uncertainty in edge position comparable to the target accuracy of 1 μm.

Table 2. Resolution limit and depth of field for different numerical apertures (λ = 550 nm)

Numerical aperture NA	Resolution limit, μm	Diffraction-limited depth of field, μm	Optics type
0.10	≈ 2.8	≈ 55	Simple clip-on lens

Numerical aperture NA	Resolution limit, μm	Diffraction-limited depth of field, μm	Optics type
0.25	≈ 1.1	≈ 9	Good macro lens / small objective
0.40	≈ 0.7	≈ 3	Microscope objective

Two definitions of the resolution limit are in use: the Abbe criterion $d = \lambda/(2 \cdot NA)$ applied here, and the Rayleigh criterion $d = 0.61\lambda/NA$, which gives values about 20 % larger (about 1.3 μm at NA = 0.25). The difference does not affect the conclusions, but it shows that the figures in the table are order-of-magnitude estimates and not guaranteed characteristics. A more complete description of a lens is given by the point spread function (PSF) and its Fourier image, the modulation transfer function (MTF): an edge in the image is the ideal step convolved with the PSF, and the steepness of the edge is determined by the width of the PSF.

The effect of edge blur on the result can be estimated with a simple model. If the blur is approximated by a Gaussian function whose full width at half maximum equals the resolution limit d, its standard deviation is $\sigma \approx d/2.355$. The 50 % level of the edge profile coincides with the true boundary, whereas moving the threshold to the 30 % or 70 % level shifts each edge by about 0.52σ, so the measured width of the fibre changes by about $\pm 1.05\sigma$. For a 20 μm fibre this gives about ±1.2 μm at NA = 0.10 and about ±0.5 μm at NA = 0.25: with good optics the measured width depends only weakly on the chosen threshold, whereas with a simple lens the choice of threshold changes the result by more than 1 μm (by about 2.5 μm between the 30 % and 70 % levels).

The marketing “100×” of smartphone macro lenses generally does not equal the true optical magnification at the sensor. Taken literally, with a sensor width of about 5–6 mm the field of view would be only 50–60 μm and the pixel size in the object plane about 0.014 μm, two orders of magnitude below the resolution limit of the optics: this is “empty magnification” that adds no information. The methodology should therefore state not the nominal magnification but the measured scale (μm per pixel), determined with a stage micrometer, and the actual resolution (for example, from a test target).

Calibration and systematic errors

Calibration of the scale deserves special attention, because the relative error of the scale is transferred without change to every measured diameter: $\delta D/D = \delta s/s$, where s is the scale in μm per pixel. A 1 % error in s therefore gives an error of 0.2 μm at D = 20 μm, and a 3 % error gives 0.6 μm, i.e. a significant part of the permissible error budget. The scale is determined by imaging a stage micrometer under exactly the same conditions (the same lens, distance and focus) and dividing the known length of the ruling by its length in pixels. The longer the interval used, the smaller the relative error of the scale, because the uncertainty in locating the end marks of the interval, of the order of one pixel at each end, is fixed in absolute terms. Since the scale of a clip-on lens depends on the working distance and on focusing, the calibration must be repeated whenever the lens is re-mounted or refocused.

A wool fibre is a semi-transparent cylinder 15–40 μm in diameter. At NA of about 0.25 depth of field (≈ 9 μm) is a substantial fraction of the fibre diameter, so the width of the visible outline depends on which plane the camera is focused on. In addition, noted above, refraction at the fibre

boundary shifts the apparent “boundary”, whose position depends on the binarisation threshold. This creates a systematic bias that cannot be removed by increasing resolution, only by keeping imaging conditions uniform and calibrating against reference samples.

The ellipticity of the cross-section can be described by the ratio k of the major to the minor axis. A fibre lying on a flat support tends to be oriented with its major axis in the plane of the support, so the measured projection is closer to the major axis than to the diameter of the circle of equivalent area, and the difference grows with k. Results of image-analysis methods may therefore differ systematically from the results of instruments that respond to the cross-sectional area or to the specific surface of the fibres; for such comparisons the bias should be estimated experimentally on reference samples and not assumed to be zero.

Sample size and statistical uncertainty

The required number of fibres to be measured is determined by the spread of diameters within the sample and by the permissible random error of the mean. The coefficient of variation of wool fibre diameter is typically 20–24 %, i.e. the standard deviation is proportional to the mean fineness (about 4.4 μm at 20 μm). The standard error of the mean is $SE = SD/\sqrt{n}$ and the half-width of the 95 % confidence interval is $E = 1.96 \cdot SE$, so for a given E the number of independent fibres required is $n = (1.96 \cdot SD/E)^2$. For n of about 100, replacing the normal quantile by the Student quantile (1.98 instead of 1.96) changes practically nothing. The results of the calculation for different fineness values at CV = 22 % are given in Table 3.

Table 3. Number of fibres required for a given random error of the mean (CV = 22%)

Mean fineness MFD, μm	SD at CV = 22%, μm	95% interval at n = 100, μm	n for ±1 μm	n for ±0.5 μm
17	3.74	±0.73	54	215
20	4.40	±0.86	75	298
23	5.06	±0.99	99	394
30	6.60	±1.29	168	669

Table 3 shows that for fine and semi-fine wool (up to 23 μm) 100 fibres are sufficient for the random component of the error of the mean not to exceed ±1 μm; for 20 μm wool it is ±0.86 μm. This is precisely the accuracy required for assigning a sample to a fineness class and for selecting animals in a flock (see the section “Application areas” below), whereas n = 300 gives ±0.5 μm, a margin that is hard to exploit as long as the systematic component is comparable to it. The total error is determined not only by the random but also by the systematic component, and independent components add in quadrature: $u = \sqrt{(b^2 + SE^2)}$. If, after calibration against reference samples, the systematic component is b ≈ 0.5 μm (a value attainable with good optics, standardised imaging and calibration, which is to be confirmed during validation), then at SD = 4.4 μm the combined standard uncertainty is 0.67 μm at n = 100 and 0.56 μm at n = 300. Thus, tripling the number of measurements reduces the uncertainty by only about 0.1 μm, whereas reducing b (better calibration, fixed illumination and edge threshold) has a markedly greater effect. Reducing the sample from 300 to 100 fibres is therefore justified by the fact that, beyond a certain n, sample size ceases to be the limiting factor of accuracy.

Moreover, the number of fibres need not be the same for all samples. It depends on the distance Δ from the mean value to the nearest class boundary: the class can be regarded as determined as soon as $1.96 \cdot SE < \Delta$, i.e. at $n = (1.96 \cdot SD/\Delta)^2$. At SD = 4.4 µm this is about 19 fibres for Δ = 2 µm, 33 for Δ = 1.5 µm, 75 for Δ = 1 µm and 100 for Δ ≈ 0.86 µm. These values take only the random component into account. Since the systematic component b also contributes, the condition should be written as $1.96 \cdot u < \Delta$, where $u = \sqrt{(b^2 + SE^2)}$, i.e. $n = SD^2/[(\Delta/1.96)^2 - b^2]$; it can be satisfied only if $\Delta > 1.96 \cdot b$ (about 1 µm at b ≈ 0.5 µm). For b ≈ 0.5 µm and SD = 4.4 µm this gives about 25 fibres for Δ = 2 µm, 58 for Δ = 1.5 µm and 156 for Δ = 1.2 µm; for Δ below about 1.1 µm the class cannot be established with n ≤ 300. The following procedure is therefore proposed: at least 100 fibres are always measured, and the mean, SD, CV and confidence interval are calculated; if $\Delta \geq 1.96 \cdot u$, the class is determined; if not, fibres are added in batches of 50 until the condition is met, but not more than 300; if the condition is still not met at n = 300 (Δ below about 1.1 µm at b ≈ 0.5 µm), the sample is considered borderline, and the result is reported with a confidence interval or the sample is sent for verification by the reference method. Because the data are inspected repeatedly, the risk of a wrong class assignment is slightly higher than the nominal 5 %; this should be checked during validation.

Application areas

Depending on the required accuracy, three groups of applications can be distinguished. (1) Preliminary on-farm sorting of animals and fleeces into broad fineness groups, where an error of ±1–2 µm is acceptable; a smartphone with a calibrated macro lens may be used here after validation. (2) Rapid assignment of wool to fineness classes at collection points, where the uncertainty should not exceed about ±1 µm and the sequential procedure described above is applied; borderline samples are sent to a laboratory. (3) Commercial pricing, certification and dispute resolution, which require certified instruments (OFDA, Sirolan Laserscan, Airflow, projection microscope); a smartphone method can replace them only after successful validation on certified reference samples. This grading will be confirmed by the validation described below.

Validation of the method

Validation of the method requires comparison with the reference method on the same samples. A set of certified reference samples (wool tops or fibre samples) covering the whole range of 15–40 µm is measured, and the following are estimated: the bias (the mean difference between the smartphone result and the reference value), the slope and intercept of the linear regression of the results on the reference values, the root-mean-square error, and the limits of agreement according to Bland and Altman, i.e. the mean difference ±1.96 of its standard deviation. A high correlation coefficient alone is not evidence of good agreement, because it is insensitive to a constant bias and to an error in scale. Repeatability (repeated measurements of the same sample by one operator) and reproducibility (different operators, smartphones and lenses) are determined separately, and the results are compared with the permissible deviations for the task in question.

Wool structure and fineness parameters

Wool is a keratin fibre with a hierarchical structure. Its surface is covered by overlapping cuticle scales, beneath which lies the cortex, formed by spindle-shaped cells and making up the bulk of the fibre; coarser fibres may also contain a medulla, an air-filled central channel of variable continuity. The cross-section is close to circular or elliptical, and the diameter varies not only between fibres in a sample but also along a single fibre, following changes in nutrition, season and the physiological state of the animal. Depending on the breed, the mean diameter of wool ranges from about 15 μm for superfine Merino to 40 μm and more for coarse wool, and the processing route and end use of the wool are determined by the combination of fineness, length, crimp and degree of medullation.

Because fibre diameter within a sample is not constant, fineness is described statistically. The main parameters are the mean fibre diameter (MFD), the standard deviation (SD) and the coefficient of variation (CV). The distribution is close to normal, usually with a slight positive skew; instruments also report derived values such as the share of fibres coarser than 30 μm and the comfort factor, i.e. the share of fibres not exceeding 30 μm. Historically, fineness was also expressed by the Bradford count, an empirical grade related to the number of hanks of yarn that can be spun from a unit mass of top; the micron value has since become the basis of trade because it is a directly measurable physical quantity. Fineness matters for spinning because the number of fibres in the yarn cross-section, and with it the evenness and strength of the yarn, depends on the fibre diameter. A mean value alone is therefore not sufficient to describe a lot: two samples with the same mean but different CV differ in their spinning properties and handle, which is why a measurement method should deliver the distribution and not only the mean.

Conclusion

Measuring wool fibre diameter from smartphone images captured with a macro lens is physically feasible in principle. However, the practical accuracy of the method depends primarily on optical resolution, calibration stability, illumination conditions, image-processing procedures, and the number of fibres measured. Nominal magnification and sensor megapixel count alone cannot establish measurement accuracy. Under the theoretical assumptions considered in this study, a sample of at least 100 fibres may provide an adequate estimate of mean diameter for preliminary fineness classification, while samples close to class boundaries require additional measurements or verification using a reference method. The proposed approach may support rapid preliminary assessment of wool on farms and at collection points. Nevertheless, its suitability for commercial grading, certification, and dispute resolution must be established through validation against certified reference samples and comparison with recognised measurement methods. Since this study is based on published literature and theoretical calculations, the proposed performance estimates should be interpreted as theoretical rather than experimentally validated results.

References

1. Australian Wool Innovation. Smartphone-based measurement of wool micron, colour and crimp. Full publication details, including the exact title, publication date and URL, require verification against the original source.

2. Shakyawar D.B., Kadam V., Surya A.K., Ahmed A., Pareek P.K., Temani P. Precise measurement of wool fibre diameter using computerized projection microscope // Indian Journal of Small Ruminants. – 2013. – Vol. 19, No. 2. – P. 190–192.
3. Li S., Yi H., Shang S. Measurement of Diameter and Scale of Cashmere Fibers by Computer Images Analysis // Journal of Fiber Bioengineering & Informatics. – 2012. – Vol. 5, No. 1. – P. 95–103. – DOI: 10.3993/jfbi03201209.
4. Quispe M.D., Benavidez G., Sauri R.A., Bengoechea J.J., Quispe E.C. Development and preliminary validation of an automatic digital analysis system for animal fibre analysis // South African Journal of Animal Science. – 2017. – Vol. 47, No. 6. – P. 822–833. – DOI: 10.4314/sajas.v47i6.10.
5. ASTM International. ASTM D2130. Standard Test Method for Diameter of Wool and Other Animal Fibers by Microprojection. Verify the applicable edition before submission. ISO 137 and the relevant IWTO standards should be listed separately after checking their official titles and editions.
6. Akhmedov A.A., Valieva Z.F., Makhkamova Sh.F., Patxullayev S.U., Mukhtarov J.R. Influence of sample mass on accuracy of wool fiber tone measurement on an acoustic device // European Chemical Bulletin. – 2022. – Vol. 11, No. 3. – P. 34–38. – DOI: 10.31838/ecb/2022.11.03.004.
7. Valieva Z.F., Akhmedov A.A. Acoustic device for determining the fineness of wool fibre // Vestnik of Vitebsk State Technological University. – 2024. – No. 3 (49). – P. 9–19.
8. Akhmedov A., Valieva Z.F., Makhkamova Sh.F. Acoustic method for measuring the diameter of wool fiber. 2020. The original publication title, publication venue, volume, issue and page range must be verified before the reference is finalised.

INFRASTRUCTURE AND TRANSPORT

CONSTRUCTION, ARCHITECTURE AND HOUSING AND UTILITIES

Received: 08.11.2026
Accepted: 14.11.2026
Published: 28.11.2026

УДК + 669.86

DOI: 10.32743/UniTech.2026.152.11.23754

Energy performance of basalt stone wool facades in Uzbekistan

Akhmadiyorov Ulugbek Solijonovich
PhD, Professor
Tashkent University of Architecture and Civil Engineering
Republic of Uzbekistan, Tashkent
E-mail: usa190380@mail.ru

Babayev Nasrullo Nurillaevich
Researcher
Tashkent University of Architecture and Civil Engineering
Republic of Uzbekistan, Tashkent
E-mail: nasrullo_1985@inbox.ru

Энергетическая эффективность фасадов из базальтового камня в Узбекистане

Ахмадиёров Улугбек Солижонович
PhD, проф.
Ташкентский архитектурно-строительный университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Бабаев Насрулло Нуриллаевич
исследователь, Ташкентский архитектурно-строительный университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Библиографическое описание: Ахмадиёров У.С., Бабаев Н.Н. Энергетическая эффективность фасадов из базальтового камня в Узбекистане // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23754

For citation: Akhmadiyorov U.S., Babayev N.N. Energy performance of basalt stone wool facades in Uzbekistan // Universum: Technical Sciences : electronic scientific journal. 2026. No. 11(152). Available at: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23754

Abstract

External stone wool insulation can lower heat transmission through opaque walls, while the choice of facade assembly determines how the insulation is protected, fixed and integrated with other building elements. This study compares rendered external thermal insulation composite systems (ETICS) and ventilated rainscreens using a technical document review and an illustrative steady-state calculation. The reference wall has a thermal resistance of 0.85 m²·K/W before insulation. At an assumed stone wool conductivity of 0.036 W/(m·K), a 100 mm layer lowers the calculated wall U-value from 1.176 to 0.276 W/(m²·K), equivalent to a 76.6 % reduction in opaque-wall transmission under the same temperature difference. Increasing thickness from 100 to 150 mm yields a smaller absolute reduction of 0.076 W/(m²·K). The comparison identifies distinct checks for the two assemblies, including render integrity and bonding for ETICS, and bracket thermal bridges, drainage and cavity fire detailing for rainscreens. The thermal results apply to the wall scenario. Project decisions also require verification of fire, moisture, acoustics, mechanical resistance and life-cycle cost.

Аннотация

Внешняя изоляция из каменной ваты может снизить теплопередачу через непрозрачные стены, в то время как выбор конструкции фасада определяет, как изоляция защищена, зафиксирована и интегрирована с другими элементами здания. В данном исследовании сравниваются закаленные внешние теплоизоляционные композитные системы (ETICS) и вентилируемые дождевые экраны, используя обзор технической документации и иллюстративный расчет стационарного состояния. Эталонная стена имеет тепловое сопротивление 0,85 м2·К/Вт до изоляции. При предполагаемой проницаемости каменной ваты 0,036 Вт/ (м·К) слой диаметром 100 мм снижает расчетное значение U-стены с 1,176 до 0,276 Вт/ (м2·К), что эквивалентно снижению непрозрачной проницаемости стены на 76,6 % при той же разнице температур. Увеличение толщины от 100 до 150 мм дает меньшее абсолютное уменьшение 0,076 Вт/ (м2·К). Сравнение выявляет различные проверки для двух агрегатов, включая целостность изображения и сцепление для ETICS, а также кронштейновые тепловые мосты, дренаж и пожарные детали для дождевых экранов. Термические результаты применимы к сценарию стен. Проектные решения также требуют проверки огнестойкости, влажности, акустики, механической стойкости и стоимости жизненного цикла.

Keywords: basalt stone wool, external wall insulation, thermal transmittance, ETICS, ventilated rainscreen.

Ключевые слова: базальтовая вата, изоляция наружных стен, теплопроводность, ETICS, вентилируемый дождевой экран.

1 Introduction

Exterior walls exchange heat with the outdoor environment during both heating and cooling periods. Adding a continuous insulation layer increases wall resistance and lowers heat flow under a given temperature difference. In retrofit projects, external placement can also improve continuity at floor edges and columns when the facade details allow the insulation to cover these junctions.

Basalt-bearing rock can be melted and fiberized to manufacture stone wool boards. The fiber network and its enclosed air spaces account for much of the board's insulating performance. Product formulations, facings and intended applications differ, so specification depends on the declared properties of the selected board [10].

Article 25 of Uzbekistan's Law No. O'RQ-940 of 7 August 2024 addresses energy saving and energy efficiency in construction. It identifies the provision of thermal insulation performance in new construction and reconstruction as a policy direction and includes the use of insulating materials among the measures [1]. This creates a policy context for evaluating external insulation. The applicable project requirements and the relevant construction and fire rules govern individual facade designs.

Stone wool can serve in a thin rendered finish or behind a panelized rainscreen. In ETICS, the board forms part of a composite kit with fixings and a reinforced render. In a rainscreen, the supporting subframe, drained cavity and cladding introduce additional interfaces. A decision based on the board's conductivity alone therefore leaves unanswered questions about actual wall heat flow, durability and the evidence needed for acceptance.

The study examines two questions. How does insulation thickness affect idealized opaque-wall heat transmission for a fixed reference wall? Which checks distinguish rendered ETICS from a ventilated rainscreen when both use stone wool? The analysis treats mechanical reliability as a property of the facade system and its load path. The building's primary structural capacity lies outside the study scope.

2 Materials and methods

2.1 Technical document review. The technical review used a purposive selection of primary documents: Uzbekistan's energy law, calculation standards for heat transfer, moisture and acoustics, a European reaction-to-fire classification reference, an ETICS assessment document and a manufacturer's datasheet illustrating product-specific declarations [1–10]. These sources establish terminology and verification methods. The review applies each source within its stated scope and uses international documents as technical references.

The comparison uses five criteria: thermal performance, fire performance, airborne sound insulation, moisture management and facade mechanical reliability. The two systems share the same idealized insulation layer in the thermal model. Their assembly details are assessed separately because hardware, openings and moisture-control layers affect performance in different ways.

2.2 Thermal model and assumptions. The one-dimensional calculation follows the series-resistance concept used in ISO 6946 [2]. The reference resistance R_0 represents the pre-insulation opaque wall and its internal and external surface resistances. A dry, continuous insulation layer of thickness d and thermal conductivity λ is added to that reference. The model uses steady-state conditions and a uniform indoor-to-outdoor temperature difference.

$$R = R_0 + d / \lambda$$
$$U = 1 / R$$
$$q = U \times \Delta T$$
$$\text{Reduction (\%)} = 100 \times (U_0 - U) / U_0$$

R is expressed in m²·K/W, d in metres, λ in W/(m·K), U in W/(m²·K), and q in W/m². U_0 is the uninsulated reference transmittance. The base value of λ is an illustrative input. The two sensitivity values bracket it and serve as scenario bounds.

Table 1. Inputs for the opaque-wall calculation

Input	Value	Role in the model
Reference resistance R_0	0.85 m²·K/W	Existing wall and surface films
Insulation thickness d	0, 50, 100, 150 mm	Discrete comparison cases
Base conductivity λ	0.036 W/(m·K)	Illustrative value
Sensitivity bounds for λ	0.034–0.040 W/(m·K)	Variation at fixed wall resistance
Temperature difference ΔT	20 K	Illustrative winter heat flux

The model excludes bracket and anchor corrections, linear thermal bridges, moisture, air leakage, solar effects and thermal storage. Junctions and subframe penetrations can be assessed using detailed two- or three-dimensional heat-flow calculations [3]. Where applicable, an area-normalized correction can combine linear coefficients Ψ (W/(m·K)) and point coefficients χ (W/K), with a consistent reference geometry and without double counting [2,3].

3 Results

3.1 Thermal transmission and sensitivity. The calculated opaque-wall U-value falls as insulation thickness increases (Table 2 and Figure 1). With 100 mm of stone wool, the calculated heat flux at ΔT = 20 K falls from 23.53 to 5.51 W/m². For that thickness, the conductivity sensitivity range produces U-values of approximately 0.264 to 0.299 W/(m²·K).

Table 2. Calculated opaque-wall performance for the base case

Thickness (mm)	R (m²·K/W)	U [W/(m²·K)]	q (W/m²)	Reduction (%)
0	0.850	1.176	23.53	0.0
50	2.239	0.447	8.93	62.0
100	3.628	0.276	5.51	76.6
150	5.017	0.199	3.99	83.1

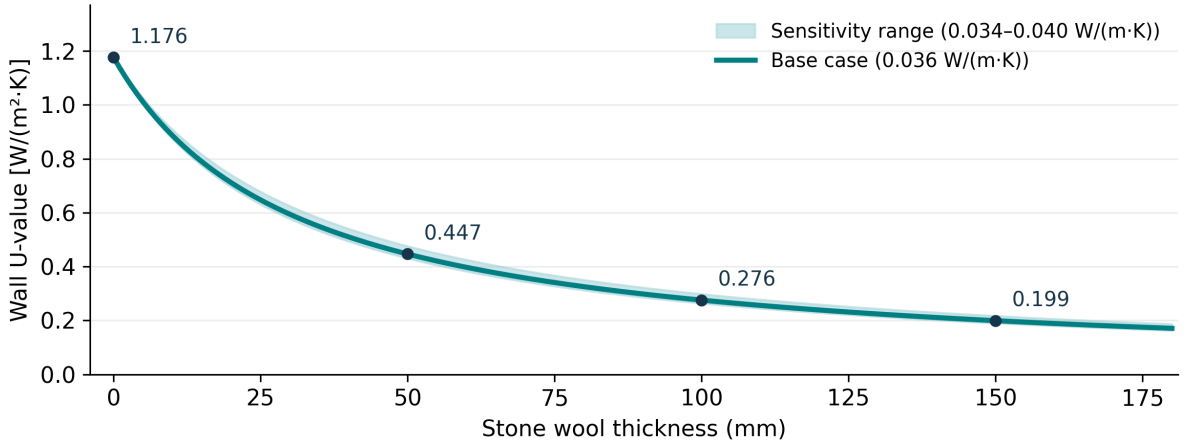


Figure 1. Calculated wall U-value as a function of stone wool thickness. The shaded band shows conductivity sensitivity

The first 50 mm decreases U by 0.730 W/(m²·K). The change from 100 to 150 mm decreases U by 0.076 W/(m²·K). This pattern follows the reciprocal relationship between U and total resistance. Selecting a project thickness also requires the target U-value, the effect of thermal bridges and the incremental cost of each thickness option.

3.2 Comparison of facade assemblies. The assemblies in Figure 2 place the insulation outside the existing wall but differ in the layer that protects it. ETICS uses a reinforced base coat and finish render as part of the assessed system [4]. The ventilated rainscreen uses a separate cladding layer on a subframe, with a cavity for drainage and ventilation. Brackets connect the subframe to the substrate and may interrupt the insulation layer.

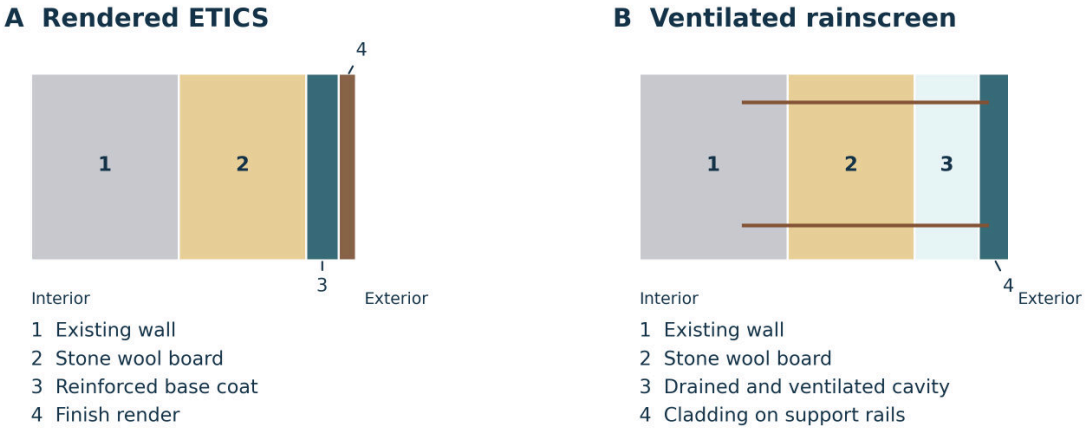


Figure 2. Conceptual sections of rendered ETICS and ventilated rainscreen assemblies. Schematic, not to scale

Table 3. Assembly differences and project verification

Criterion	Rendered ETICS	Ventilated rainscreen
Heat flow	Check board continuity, reveals and point fixings.	Evaluate heat flow through brackets and edge details.
Rain control	Check render continuity, flashings and splash zones.	Check cavity drainage, flashings and protected openings.
Fire	Verify the documented kit and opening details.	Verify cladding, membranes and cavity fire detailing.

Criterion	Rendered ETICS	Ventilated rainscreen
Load path	Verify substrate, adhesive bond and anchor resistance.	Verify cladding, rails, brackets and anchors to substrate.
Acoustics	Evaluate the facade including windows and vents.	Evaluate the facade including joints, windows and vents.

A product declaration can supply board-level thermal or reaction-to-fire data. Verification of the assembled facade requires documents that correspond to its components and configuration [4,5,10].

4 Discussion

4.1 Energy and life-cycle implications. The 76.6 % reduction for the 100 mm case describes transmission through the modeled opaque wall at a fixed temperature difference. A whole-building assessment must account for wall area, windows, roofs, ventilation, infiltration, solar and internal gains, local weather and equipment performance. An energy model using an appropriate climatic file and operating schedules can estimate heating and cooling needs and translate them to delivered energy using system efficiencies [8]. In summer, solar exposure, shading and ventilation can substantially alter cooling loads, particularly where glazing accounts for a large share of the facade.

The thickness comparison suggests evaluating the additional cost of thicker boards together with the additional reduction in corrected heat loss. A life-cycle comparison should include installed cost, inspection, planned maintenance, replacement and discounted energy expenditure [9]. Actual tariffs, service lives and maintenance assumptions should be tested in scenarios. Environmental comparisons should use comparable product declarations where available, with consistent functional units, service lives and life-cycle boundaries. Natural mineral origin alone cannot establish the comparative environmental burden.

4.2 Fire performance and airborne sound. The European A1 reaction-to-fire class applies to the product or configuration covered by its classification documentation [5]. The design must also consider facade geometry, opening interfaces, and, where present, cavities and their fire stopping. Evidence for reaction to fire, external fire spread and fire resistance addresses distinct questions. A project should identify the evidence required for the intended assembly and building under the applicable rules.

Stone wool can absorb acoustic energy within an assembly. The resulting airborne sound insulation of an exterior facade depends on the areas and sound reduction characteristics of its components, junctions, and transmission through openings [6]. Windows, air inlets and gaps can dominate performance even when the opaque wall performs well. Acoustic claims expressed in decibels require assembly data or suitable field measurements.

4.3 Moisture and mechanical durability. The vapor permeability of a stone wool board is one input to moisture assessment. Rain penetration, construction moisture, air movement and drying conditions also affect the wall. For ETICS, the designer should check render and flashing continuity at openings, parapets and plinths. For rainscreens, the drainage path and cavity ventilation must work with the fire and weather protection details. A simplified condensation assessment can screen selected risks [7]. Assemblies exposed to significant wind-driven rain or with moisture-sensitive layers may need a transient hygrothermal assessment. Wind suction and cladding dead load must be

traced to the substrate through the applicable fixings. In retrofit work, the condition of the masonry or concrete substrate can govern anchor resistance. Product selection should use mechanical characteristics relevant to the assembly, such as tensile strength perpendicular to the board faces for bonded render systems. Site checks can include substrate assessment, anchor tests where specified, and inspection of board joints, openings and cavity details before concealment.

4.4 Study limitations. The wall resistance, temperature difference and conductivity in this study define an illustrative scenario. Field energy use, acoustic measurements, facade fire tests, moisture records and cost data were outside the study design. Results therefore support comparison of design options and identification of project checks. A building-specific study would require the existing wall build-up, surveyed junction geometry, product documentation, local climatic inputs and independent verification of the constructed assembly.

5 Conclusion

For a reference opaque wall with R_0 = 0.85 m²·K/W, the modeled addition of 100 mm of stone wool lowers U from 1.176 to 0.276 W/(m²·K). The additional reduction obtained by increasing thickness to 150 mm is smaller than the reduction at the first thickness increment. Rendered ETICS and ventilated rainscreens use the same thermal principle but require different evidence for attachment, rain protection and fire behavior. A project specification in Uzbekistan should combine the corrected wall U-value with assembly documentation, installation checks and an energy and cost assessment using building-specific inputs.

References

1. Republic of Uzbekistan. (2024). Law No. O‘RQ-940 of 7 August 2024 on energy saving, rational energy use and energy efficiency improvement. Article 25.
2. International Organization for Standardization. ISO 6946. Building components and building elements – Thermal resistance and thermal transmittance – Calculation methods. – International Organization for Standardization. – 2017.
3. International Organization for Standardization. ISO 10211. Thermal bridges in building construction – Heat flows and surface temperatures – Detailed calculations. – International Organization for Standardization. – 2017.
4. European Organisation for Technical Assessment. EAD 040083-01-0404. External thermal insulation composite systems with rendering system. – European Organisation for Technical Assessment. – 2024.
5. European Commission. (2016). Commission Delegated Regulation (EU) 2016/364 on classification of the reaction to fire performance of construction products.
6. International Organization for Standardization. ISO 12354-3. Building acoustics – Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements – Part 3: Airborne sound insulation against outdoor sound. – International Organization for Standardization. – 2017.

7. International Organization for Standardization. International Organization for Standardization. ISO 13788. Hygrothermal performance of building components and building elements – Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation – Calculation methods. – International Organization for Standardization. – 2012.
8. International Organization for Standardization. International Organization for Standardization. ISO 52016-1. Energy performance of buildings – Energy needs for heating and cooling, internal temperatures and sensible and latent heat loads – Part 1: Calculation procedures. – International Organization for Standardization. – 2017.
9. International Organization for Standardization. ISO 15686-5. Buildings and constructed assets – Service life planning – Part 5: Life-cycle costing. – International Organization for Standardization. – 2017.
10. ROCKWOOL. RainScreen Duo Slab technical datasheet, version 1.06. – ROCKWOOL. – 2025.

Received: 13.10.2026
Accepted: 25.10.2026
Published: 28.11.2026

УДК 532.542+519.6

DOI: 10.32743/UniTech.2026.152.11.23628

Effect of pipe elbow angle on flow kinematics and hydraulic losses based on ANSYS Fluent simulation

Norkulov Bakhodir Musulmanovich
doctor of Technical Sciences (DSc)
Samarkand State Technical University
Uzbekistan, Samarkand
ORCID: 0000-0001-7927-6381
E-mail: boxa_833@mail.ru

Suvonov Obidjon Shukurullayevich
Doctoral Researcher
Samarkand State Technical University
Uzbekistan, Samarkand
ORCID: 0009-0001-2909-4448
E-mail: obid_suvonov@mail.ru

Влияние угла поворота трубопроводного отвода на кинематику потока и гидравлические потери по результатам моделирования в ANSYS Fluent

Норкулов Баходир Мусулманович
[1] д-р техн. наук
(DSc), Самаркандский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Самарканд

Сувонов Обиджон Шукуруллаевич[2]
докторант
Самаркандский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Самарканд

Abstract

The objective of this study is to determine how pipe-elbow geometry affects turbulent-flow structure and integral hydraulic characteristics. Steady flow in a pressurized pipeline was simulated in ANSYS Fluent for configurations with branch angles of 90°, 120°, and 135°, using Reynolds-averaged Navier–Stokes equations closed by the k–kL–ω transition model (Walters–Cokljat).

Библиографическое описание: Норкулов Б.М., Сувонов О.Ш. Влияние угла поворота трубопроводного отвода на кинематику потока и гидравлические потери по результатам моделирования в ANSYS Fluent // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23628

For citation: Norkulov B.M., Suvonov O.S. Effect of pipe elbow angle on flow kinematics and hydraulic losses based on ansys fluent simulation // Universum: Technical Sciences : electronic scientific journal. 2026. No. 11(152). Available at: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23628

Velocity and static-pressure fields, separation regions, and secondary-flow features were examined, while iterative convergence was assessed from solver residuals. For the two configurations with complete integral output, the smoother geometry was associated with reductions in peak local velocity, overall pressure difference, and resultant outlet load. Cavitation was assessed by comparing absolute pressure with water vapor pressure. The reported pressure differences characterize the full computational section and must not be interpreted as isolated elbow-loss coefficients. Reliable quantitative ranking of all three geometries still requires a matched straight-pipe baseline, grid-independence analysis, and external validation. The study provides a physically grounded framework for evaluating elbow configurations while distinguishing established simulation observations from additional verification needed for design recommendations.

Аннотация

Цель исследования – установить влияние геометрии трубопроводного отвода на структуру турбулентного потока и интегральные гидравлические характеристики. Численное моделирование выполнено в ANSYS Fluent для напорного трубопровода с вариантами углов между ветвями 90°, 120° и 135° с применением уравнений RANS и переходной модели k–kL–ω (Walters–Cokljat). Проанализированы поля скорости и статического давления, зоны отрыва и вторичные течения; итерационная сходимость оценена по невязкам. Для двух вариантов, обеспеченных полными интегральными данными, более плавная геометрия сопровождалась снижением максимальной локальной скорости, перепада давления и результирующей нагрузки. Кавитационная оценка выполнена сравнением абсолютного давления с давлением насыщенного пара. Установлено, что полученные данные характеризуют общие потери исследуемого участка, а не изолированный коэффициент местного сопротивления. Для окончательного количественного ранжирования всех геометрий необходимы расчет прямолинейного эталона, исследование сеточной независимости и внешняя валидация. Практическая значимость состоит в определении критериев обоснованного выбора геометрии отвода в напорных водоводах.

Keywords: pressurized pipe, pipe elbow, elbow angle, turbulent flow, hydraulic losses, ANSYS Fluent, cavitation.

Ключевые слова: напорный трубопровод, трубопроводный отвод, угол поворота, турбулентный поток, гидравлические потери, ANSYS Fluent, кавитация.

Introduction

Pipe elbows are indispensable in pressurized water-supply and industrial systems, but changes in flow direction induce streamline curvature, secondary motion, separation and additional pressure losses. The interaction between centrifugal acceleration, adverse pressure gradients and turbulent momentum transfer produces a nonuniform velocity profile that can persist downstream of the bend. As a result, a local velocity maximum or a contour-plot pressure extremum cannot alone establish the energy loss attributable to an elbow. Classical hydraulic-resistance correlations (Idelchik; Miller) provide engineering reference values but depend on the definition of bend angle, radius-to-diameter ratio, Reynolds number and measurement stations. RANS-based CFD permits a spatial description of these mechanisms; however, its credibility requires iterative convergence,

grid-refinement verification and validation against independent evidence (Walters and Cokljat; Celik et al.; Roache). In particular, a low solver residual is not proof of mesh independence. Existing CFD-based comparisons must also distinguish total system pressure drop from the isolated local-loss coefficient, because straight-pipe friction and differences in computational length may mask the bend contribution. This study addresses these methodological issues by explicitly separating directly reported simulation observations from quantities requiring additional calculations.

The objective is to compare the available ANSYS Fluent results for 90°, 120° and 135° branch-angle configurations, explain their flow physics, and identify the hydraulic and verification quantities needed for a defensible comparison. The tasks are to examine flow separation and pressure redistribution; compare available integral outputs for 90° and 120°; assess cavitation using absolute pressure; formulate a matched-baseline evaluation of the local resistance coefficient; and specify a reproducible three-grid GCI and reference-validation procedure. The 135° case is included in the qualitative convergence comparison, but its integral hydraulic results are not available in the supplied dataset.

Materials and Methods

The research objects were the 90°, 120°, and 135° elbow configurations of a circular pressurized pipe with a diameter of D = 1 m. The computational domain comprised an inlet branch, a bend region, and an outlet branch. Water at 20 °C was treated as an incompressible Newtonian fluid. The Reynolds-averaged Navier–Stokes equations were solved for steady turbulent flow.The preceding chapters examined the theoretical foundations for describing the kinematic structure of turbulent flow in pressurised pipelines, the parameters of the velocity profile, and the determination of the hydraulic resistance coefficient. In this chapter, the problem is investigated numerically. Turbulent flow was modelled in ANSYS Fluent 2026 R1 for a pressurised pipeline with a diameter of 1,000 mm, a total length of 200 m, and a single change in flow direction; the results were post-processed in CFD-Post. The principal objective of the numerical study was to evaluate separately the friction losses along the pipeline and the local resistance at the elbow, analyse the velocity and pressure fields, and compare the numerical results with the Darcy-Weisbach, Colebrook-White, Altshul, Shevelev, and Idelchik correlations.

The study was conducted for three geometric configurations in which the angle between the two pipe branches was 90°, 120°, and 135°. The corresponding flow-deflection angles were δ = 90°, 60°, and 45°, respectively. The pipe diameter, total length, fluid properties, and inlet flow rate were kept identical in all configurations; therefore, the differences in pressure loss between the configurations mainly reflect the influence of elbow geometry.

The steady turbulent motion of water in a pressurised pipeline is described by the Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) equations. For an incompressible fluid, the continuity equation is written as follows:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0, \tag{1}$$

The momentum equation is:

$$\rho\,\bar{u}_j\frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial\bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial\bar{u}_j}{\partial x_i}\right) - \rho\,\overline{u_i' u_j'}\right] + \rho g_i, \tag{2}$$

where $\bar{u}_i$ denotes the mean velocity components, m/s; $\bar{p}$ is the mean pressure, Pa; μ is the dynamic viscosity, Pa·s; $\rho u_i' u_j'$ represents the Reynolds stresses; and g_i denotes the components of the gravitational acceleration vector. The final term is included only when gravity is enabled in the model; where the elevation varies along the pipeline axis, it adds a hydrostatic component to the pressure distribution. This aspect is considered when the numerical results are analysed.

Based on the Boussinesq hypothesis, the Reynolds stresses are expressed in terms of the turbulent viscosity μ_t as follows:

$$-\rho\,\overline{u_i' u_j'} = \mu_t\left(\frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial\bar{u}_j}{\partial x_i}\right) - \frac{2}{3}\rho k\,\delta_{ij}. \tag{3}$$

The presence of the kl, kt, and omega variables in the residual plots indicates that the three-equation k-kL-ω transition model (Walters-Cokljat), which accounts for the laminar-to-turbulent transition process, was employed. The model solves transport equations for the turbulent kinetic energy kT, laminar (fluctuation) kinetic energy kL, and specific dissipation rate ω:

$$\frac{Dk_T}{Dt} = P_{k_T} + R_{BP} + R_{NAT} - \omega k_T - D_T + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\nu + \frac{\alpha_T}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k_T}{\partial x_j}\right], \tag{4}$$

$$\frac{Dk_L}{Dt} = P_{k_L} - R_{BP} - R_{NAT} - D_L + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\nu\frac{\partial k_L}{\partial x_j}\right], \tag{5}$$

$$\frac{D\omega}{Dt} = C_{\omega 1}\frac{\omega}{k_T}P_{k_T} + \left(\frac{C_{\omega R}}{f_W} - 1\right)\frac{\omega}{k_T}(R_{BP} + R_{NAT}) - C_{\omega 2}\,\omega^2 + C_{\omega 3}\,f_\omega\,\alpha_T\,f_W^2\frac{\sqrt{k_T}}{d_w^3} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\nu + \frac{\alpha_T}{\sigma_\omega}\right)\frac{\partial\omega}{\partial x_j}\right], \tag{6}$$

where PkT and PkL are the production terms for turbulent and laminar fluctuation energy, respectively; RBP and RNAT represent the transfer of energy from kL to kT through bypass and natural-transition mechanisms; DT and DL are near-wall dissipation terms; dw is the distance to the wall; αT is the turbulent diffusivity; and Cω1, Cω2, Cω3, CωR, σk, and σω are empirical model constants. The model is intended to resolve the near-wall region directly and therefore requires y+ ≈ 1 at the first computational point adjacent to the wall. This requirement is particularly important when evaluating the computational mesh.

The governing equations are discretised using the finite-volume method. For each computational cell VP, the general transport equation is written in integral form as follows:

$$\sum_f \rho\,\phi_f\,\left(\mathrm{u}_f \cdot \mathrm{A}_f\right) = \sum_f \Gamma_\phi(\nabla\phi)_f \cdot \mathrm{A}_f + S_\phi V_P, \tag{7}$$

where φ is the transported variable (a velocity component, kT, kL, or ω); A^f is the face-area vector of the cell; Γφ is the diffusion coefficient; and Sφ is the source term. Pressure-velocity coupling is ensured by a pressure-correction algorithm. Convergence of the solution is monitored using scaled residuals:

$$R_\phi = \frac{\sum_P \left|\sum_{nb} a_{nb}\phi_{nb} + b - a_P\phi_P\right|}{\sum_P |a_P\phi_P|}. \quad (8)$$

The hydraulic resistance coefficient can be determined from the numerical solution by two independent approaches. The first approach is based on the mean wall shear stress τ̄w:

$$\lambda_\tau = \frac{8\,\bar{\tau}_w}{\rho\,\vartheta^2}, \quad (9)$$

The second approach is based on the total head loss between two cross-sections. When local resistance and an elevation difference are present between the sections, the overall head balance is written as follows:

$$\frac{p_1 - p_2}{\rho g} + \frac{\vartheta_1^2 - \vartheta_2^2}{2g} + (z_1 - z_2) = \lambda\frac{L}{d}\frac{\vartheta^2}{2g} + \zeta\frac{\vartheta^2}{2g}. \quad (10)$$

Because Equation (10) contains two unknowns, λ and ζ, they cannot be uniquely separated from a single numerical experiment. Therefore, a difference method was applied in this study. For two configurations having the same length, diameter, and flow rate but different elbow angles, the friction term cancels, allowing the difference between the local resistance coefficients to be determined directly:

$$\Delta\zeta = \zeta_{\delta_1} - \zeta_{\delta_2} = \frac{\Delta p_{\delta_1} - \Delta p_{\delta_2}}{\rho\,\vartheta^2/2}. \quad (11)$$

The advantage of this approach is that systematic errors associated with the computational mesh, turbulence model, and boundary conditions are nearly identical in both configurations and are therefore substantially reduced when the results are differenced.

At the inlet, mean velocity was prescribed; the outlet was assigned zero gauge pressure; and a no-slip condition was imposed at solid walls. Mesh refinement was concentrated near the bend and walls. For a valid comparative study, the same fluid properties, bulk flow rate, wall roughness, upstream and downstream measurement positions, and numerically comparable near-wall resolution must be used for every geometry. The supplied results do not report the exact inlet bulk velocity, bend radius, mesh cell counts, y+ distribution or section-averaged pressure reports; these parameters must be documented from the solver setup before reproducibility can be claimed.

Local-loss isolation. For each elbow, compute the total-pressure drop between identical reference sections and subtract the total-pressure drop for a hydraulically equivalent straight-pipe baseline with the same bulk velocity, diameter, roughness and matched straight-run contribution. The isolated coefficient is$\zeta = \frac{\Delta p_{0,elbow} - \Delta p_{0,baseline}}{\rho U^2/2}$, where Δp_0 denotes the difference of section-averaged total pressure. If the comparison geometries have unequal straight lengths, friction losses must be corrected explicitly. The existing values 21,020 and 20,660 Pa must not be inserted directly as local elbow losses.

Grid verification protocol. Generate coarse, medium and fine systematically refined meshes for each geometry; record cell count N, representative mesh size h, mean near-wall y+, mass imbalance, section-averaged total-pressure drop and ζ. For a three-dimensional domain, h is

proportional to $h = \left(\frac{V}{N}\right)^{1/3}$Determine the observed order p from three-grid results, the fine-grid relative difference $e_{21} = \frac{|\varphi_1 - \varphi_2|}{|\varphi_1|}$ and $GCI_{21} = \frac{1.25\ e_{21}}{{r_{21}}^{p} - 1} \times 100\%$, provided asymptotic refinement and monotonic convergence assumptions are met. Report the GCI for each geometry and the uncertainty of between-geometry differences. No GCI number is claimed here because three-grid raw outputs were not supplied.

External validation protocol. Match the bend-angle definition, curvature ratio R/D, Reynolds number and pressure-tap locations to the chosen Idelchik or experimental reference; then calculate relative error $= \frac{100|\zeta_{CFD} - \zeta_{ref}|}{|\zeta_{ref}|}$. If the reference configuration is not geometrically equivalent, report a qualitative benchmark rather than an apparent quantitative validation. The required reference ζ and matched CFD baseline have not been provided.

Table 1. Principal parameters of the numerical model

Parameter	Specified value	Purpose of verification
Pipe diameter	D = 1 m	Geometric similarity
Configurations	90°, 120°, 135°	Effect of deflection angle
Fluid	Water, 20 °C	Specification of ρ and ν
Turbulence model	k–kL–ω transition model (Walters–Cokljat)	Flow separation and near-wall flow
Outlet	p = 0 Pa gauge	Determination of pressure difference
Convergence	Residuals and mass balance	Numerical reliability

Results and Discussion

Assessment of Numerical Convergence

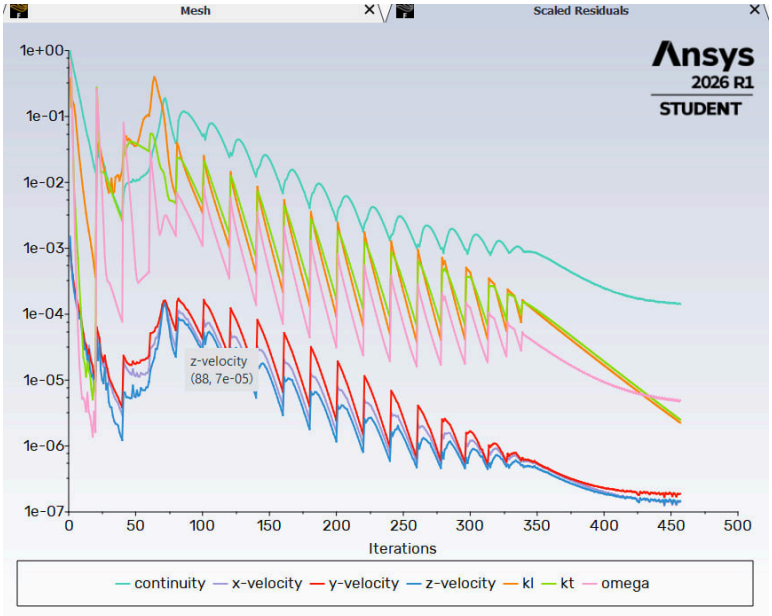
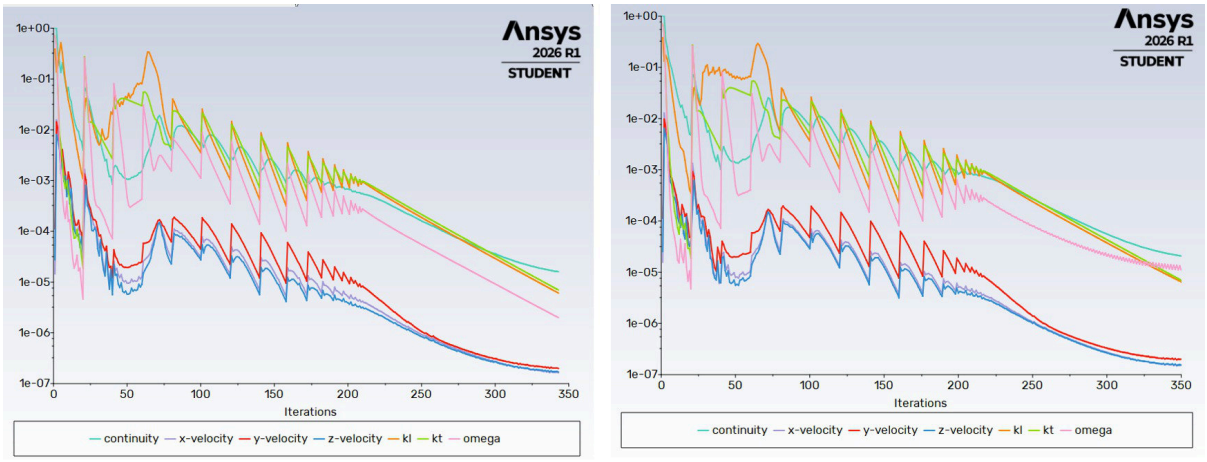


Figure 1. Variation of scaled residuals with iteration number for the 90° configuration



а) б)

Figure 2. Scaled residuals for the 120° and 135° configurations

The convergence process consisted of two stages. Initially, the residuals exhibited periodic saw-tooth oscillations; subsequently, their amplitudes decreased and a monotonic decay stage began. The periodic jumps can be attributed to stepwise changes in the solution-control parameters. By the end of the calculation, the residuals of the momentum equations had decreased to the order of 10^{-7}, while those of the turbulence equations reached the order of 10^{-6}–10^{-5}.

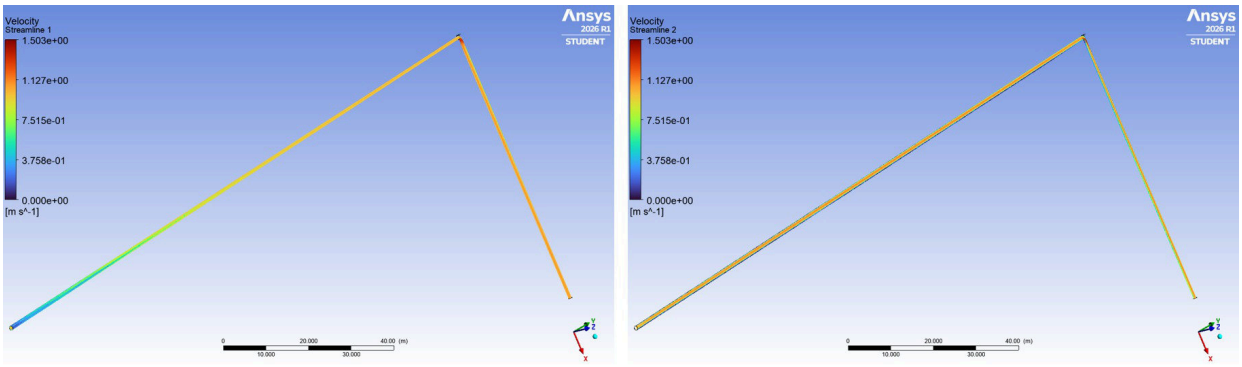
$$\varepsilon_m = \frac{|\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out}|}{\dot{m}_{in}} 100\% \quad (12)$$

The supplied convergence plots indicate reduction of residuals, but the mass-flow reports needed to independently verify a numerical mass-balance percentage are not included. Iterative convergence cannot establish grid independence; a three-mesh study and GCI calculation are therefore required before numerical uncertainty can be quantified.

Table 2. Scaled residuals at the end of the calculations

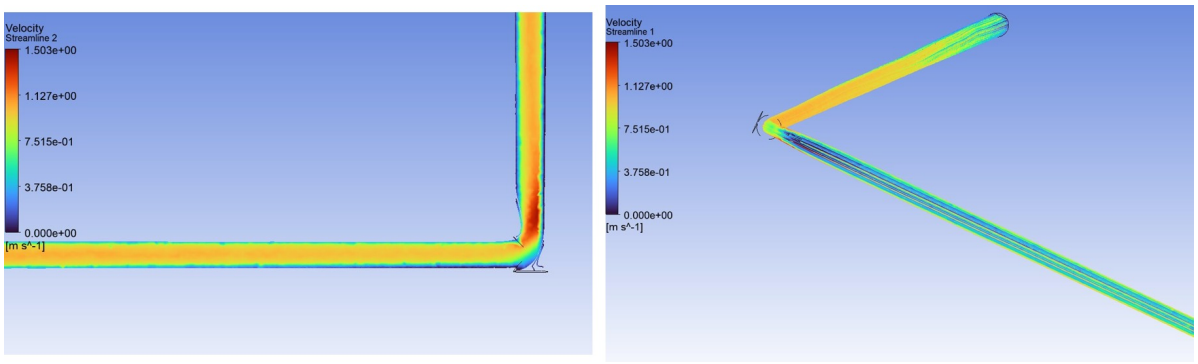
Equation	90°	120°	135°
Continuity	1.4×10^{-4}	1.6×10^{-5}	2.0×10^{-5}
x-, y-, and z-momentum	$1.5–1.8 \times 10^{-7}$	$1.6–2.0 \times 10^{-7}$	$1.5–2.0 \times 10^{-7}$
k_l, k_t	2.3×10^{-6}	$6–7 \times 10^{-6}$	7×10^{-6}
ω	5×10^{-6}	2×10^{-6}	1.2×10^{-5}

Scientific Analysis of the Velocity Field



а) б)

Figure 3. Velocity distribution along streamlines for the 90° and 120° configurations



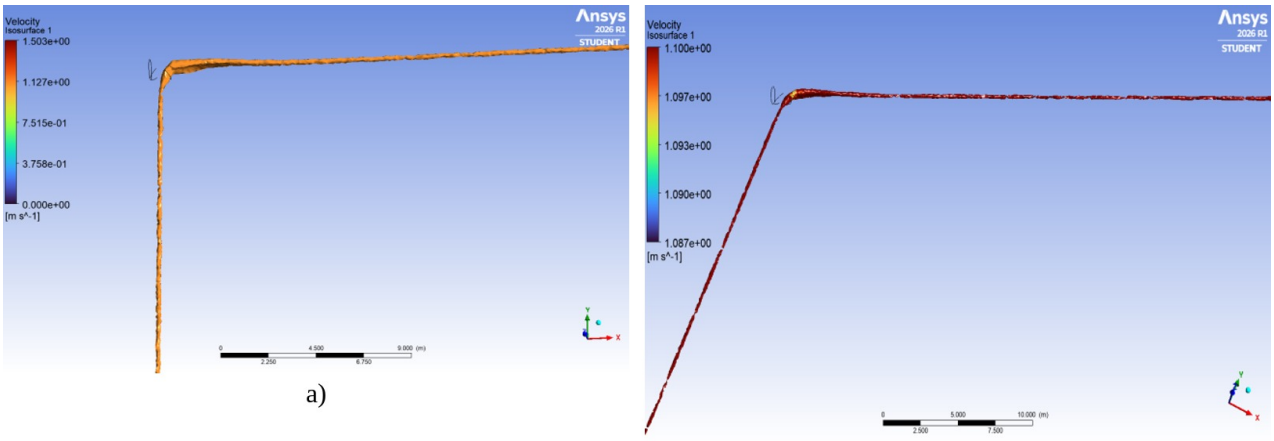
а) б)

Figure 4. Velocity field and secondary flows in the vicinity of the elbow

In the straight branches, the velocity in the flow core was 1.13–1.20 m/s and decreased to zero at the wall. In the 90° elbow, the flow was displaced toward the outer wall, and a separation zone developed along the inner wall. Owing to the local reduction in the effective flow area, the velocity increased to 1.503 m/s. Within the separation zone, the velocity decreased to 0–0.4 m/s, producing recirculation.

In the 120° configuration, the maximum local velocity was 1.385 m/s, which was 7.9 % lower than in the 90° configuration. This result indicates that smoothing the geometry reduces flow separation and velocity non-uniformity across the section. Dean vortices generated downstream of the elbow prolong the recovery of the velocity profile; consequently, positioning the monitoring section too close to the elbow may distort integral results.

Deformation of the Flow Core



а) б)

Figure 5. Isosurface corresponding to u = 1.1 m/s: (a) 90° configuration; (b) 120° configuration

In the straight section, the isosurface is nearly symmetric about the pipe axis. In the elbow region, it shifts toward the outer wall and becomes distorted. The deformation is pronounced in the 90° configuration and smoother in the 120° configuration. This qualitative behavior is consistent with the integral pressure-loss results.

$$h = \frac{p_1 - p_2}{\rho g} + \frac{U_1^2 - U_2^2}{2g} + z_1 - z_2 \tag{13}$$

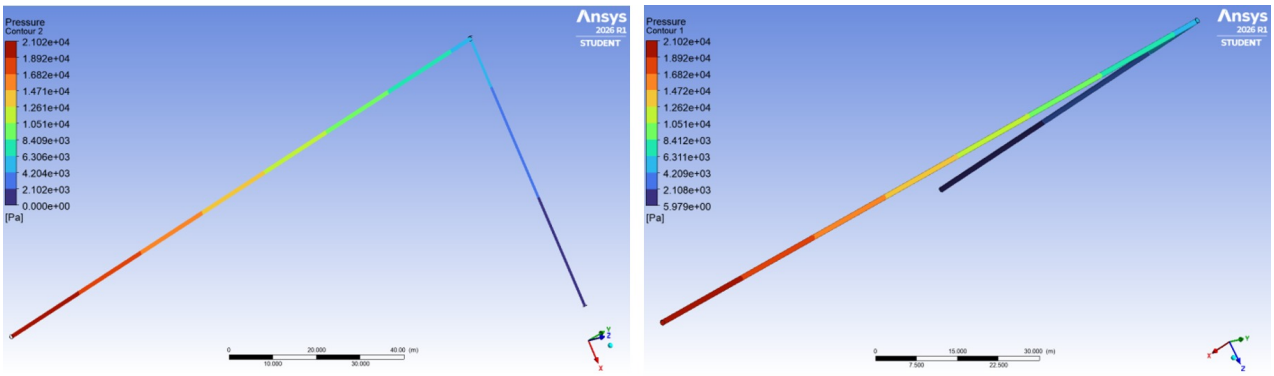
For a horizontal pipe, where $z_1 = z_2$, the total head loss is determined from the difference between the pressure heads and velocity heads. When the mean inlet and outlet velocities are nearly equal, the pressure difference provides the dominant contribution.

$$h_f = \lambda \frac{L}{D} \frac{U^2}{2g}, \qquad h_m = \zeta \frac{U^2}{2g} \tag{14}$$

$$\zeta = \frac{2g\, h_m}{U^2} \tag{15}$$

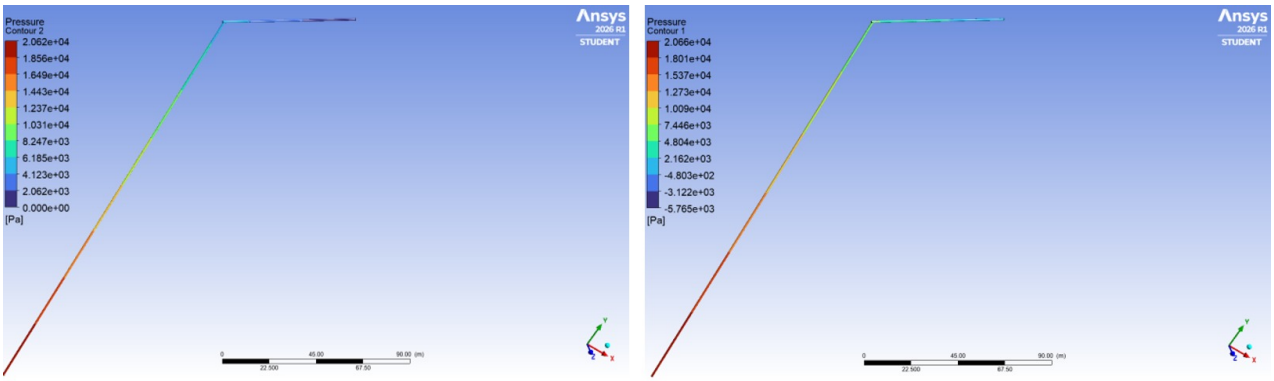
The reported overall pressure difference includes distributed friction and bend-induced losses. The isolated local-loss coefficient ζ cannot be determined from this overall pressure difference alone. A matched straight-pipe baseline and section-averaged total-pressure reports are required; see the methodological protocol above.

Pressure Field and Cavitation Criterion



а) б)

Figure 6. Static-pressure distribution in the 90° configuration



а) б)

Figure 7. Static-pressure distribution in the 120° configuration

In the 90° configuration, the static gauge pressure decreased from approximately 2.102×10^4 Pa at the inlet to zero at the outlet. Pressure increased along the outer wall of the elbow owing to centrifugal effects, whereas it decreased along the inner wall as a result of flow separation. In the 120° configuration, the maximum pressure was 2.066×10^4 Pa and the minimum gauge pressure was -5.765×10^3 Pa.

$$p_{abs} = p_{gauge} + p_{atm} \tag{16}$$

$$\sigma = \frac{p_{abs} - p_v}{0.5\rho U^2}, \quad p_{abs} > p_v \tag{17}$$

At an atmospheric pressure of 101,325 Pa, a gauge pressure of −5,765 Pa corresponds to an absolute pressure of approximately 95.6 kPa. This value is substantially higher than the vapor pressure of water at 20 °C, pv ≈ 2.34 kPa. Therefore, the risk of cavitation is not confirmed for the operating condition considered. Nevertheless, air release at high points of the pipeline and under low operating pressure should be assessed separately.

Integral Hydraulic Parameters

The available ANSYS dataset contains integral quantities for 90° and 120° only. The 135° column cannot be populated without the actual solver reports; residual curves are not substitutes for hydraulic results. Required outputs: area-averaged inlet/outlet total pressure, bulk velocity, peak velocity, minimum absolute pressure, outlet force and baseline-corrected ζ.

Table 3. Integral hydraulic parameters obtained from the ANSYS simulations

Parameter	Symbol	90°	120°
Pressure difference, Pa	Δp	21,020	20,660
Piezometric-head difference, m	$\Delta p/(\rho g)$	2.147	2.110
Velocity-head difference, m	$\Delta U^2/(2g)$	0.0049	0.0049
Total head loss, m	h	2.151	2.115
Maximum local velocity, m/s	u_{max}	1.503	1.385
Minimum gauge pressure, Pa	p_{min}	≈6	−5,765
Resultant outlet force, N	F_2	707.9	613.2
Mean stress, Pa	F_2/A_2	916	794

Increasing the angle between the branches from 90° to 120° reduced the total pressure difference by 360 Pa, or 1.71 %. The head loss decreased from 2.151 m to 2.115 m. The resultant force at the outlet section decreased from 707.9 N to 613.2 N, corresponding to a reduction of 13.4 %. Thus, the smoother bend reduced not only the energy loss but also the non-uniformity of momentum and pressure at the outlet section.

The listed outlet resultant force is a surface-integrated output and should not be equated to the net force on the elbow without including all inlet, outlet and wall pressure and momentum-flux contributions. The reported “mean stress” F_2/A_2 is an average force per area, not a verified structural wall stress.

Although the differences between the results may appear small, their cumulative effect on energy consumption can become significant in a trunk pipeline containing numerous elbows. However, before an economic recommendation is made, the curved-pipe length, installation footprint, fitting cost, and operating regimes must also be considered.

The values in Table 3 are retained as originally reported, but the source does not establish whether they were extracted as section averages or contour extrema. They should therefore be treated as provisional overall pressure differences, not independently verified energy-loss measures. No numerical optimum can be asserted for the 135° case without its integral results.

The numerical experiment revealed the physical effect of elbow angle on the flow structure: as the bend becomes sharper, the high-momentum flow core along the outer wall intensifies, the separation zone along the inner wall expands, and the maximum velocity increases. This mechanism increases the pressure loss and the non-uniform loading of the pipe wall.

The low residual values demonstrate iterative stability of the solution, but they do not by themselves confirm the physical validity of the model. Unless mesh independence is assessed using the Grid Convergence Index (GCI), sensitivity to the turbulence model is examined, and verification against experimental data is reported, the numerical accuracy cannot be considered fully established.

For cavitation assessment, it is incorrect to compare gauge pressure directly with vapor pressure; the gauge pressure must first be converted to absolute pressure. In the present study, pabs ≈ 95.6 kPa, which is considerably higher than the vapor pressure. Accordingly, the term “vacuum zone” denotes a region of negative gauge pressure rather than an actual vaporization zone.

Conclusions

1. Flow separation and secondary vortices were more pronounced in the 90° elbow than in the 120° configuration, and the maximum velocity increased to 1.503 m/s.

2. In the 120° configuration, the maximum velocity, total pressure difference, and resultant outlet force decreased by 7.9 %, 1.71 %, and 13.4 %, respectively.

At the assumed atmospheric reference pressure, the reported minimum gauge pressure corresponds to an absolute pressure well above the saturation pressure at 20 °C; local vapor cavitation is therefore not indicated for this reported operating state. The conclusion does not apply automatically to other absolute-pressure boundary conditions.

4. Recalculate section-averaged total-pressure losses and isolate ζ with a matched straight-pipe reference before claiming local hydraulic resistance.

5. Complete a three-level grid study with GCI, external benchmark validation, and full 135° integral reports; these checks have not yet been completed in the provided data.

6. For the two numerically tabulated cases, the smoother geometry showed lower reported indicators; a general optimum and economic benefit cannot be established without corrected loss coefficients, uncertainty bounds and installation-cost comparison.

References

1. ANSYS Fluent Theory Guide / ANSYS, Inc. – Canonsburg, PA: ANSYS, Inc. – 2026.
2. ANSYS Fluent User's Guide / ANSYS, Inc. – Canonsburg, PA: ANSYS, Inc. – 2026.
3. Brennen, C.E. Cavitation and Bubble Dynamics / C.E. Brennen. – New York: Oxford University Press, 1995.
4. Celik, I.B. Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications / I.B. Celik, U. Ghia, P.J. Roache [и др.] // Journal of Fluids Engineering. – 2008. – Vol. 130, No. 7. – Art. 078001. – DOI: 10.1115/1.2960953.
5. Ferziger, J.H. Computational Methods for Fluid Dynamics / J.H. Ferziger, M. Perić, R.L. Street. – 4th ed. – Cham: Springer, 2020.
6. Franc, J.-P. Fundamentals of Cavitation / J.-P. Franc, J.-M. Michel. – Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2004.
7. Idelchik, I.E. Handbook of Hydraulic Resistance / I.E. Idelchik. – 4th ed. – Redding: Begell House, 2007.

8. Menter, F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications / F.R. Menter // AIAA Journal. – 1994. – Vol. 32, No. 8. – P. 1598–1605. – DOI: 10.2514/3.12149.
9. Miller, D.S. Internal Flow Systems / D.S. Miller. – 2nd ed. – Cranfield: BHRA, 1990.
10. Munson, B.R. Fundamentals of Fluid Mechanics / B.R. Munson, D.F. Young, T.H. Okiishi, W.W. Huebsch. – 7th ed. – Hoboken: Wiley, 2013.
11. Pope, S.B. Turbulent Flows / S.B. Pope. – Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
12. Roache, P.J. Verification and Validation in Computational Science and Engineering / P.J. Roache. – Albuquerque: Hermosa Publishers, 1998.
13. Schlichting, H. Boundary-Layer Theory / H. Schlichting, K. Gersten. – 9th ed. – Berlin: Springer, 2017.
14. Versteeg, H.K. An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method / H.K. Versteeg, W. Malalasekera. – 2nd ed. – Harlow: Pearson, 2007.
15. White, F.M. Fluid Mechanics / F.M. White. – 8th ed. – New York: McGraw-Hill Education, 2016.
16. Walters, D.K. A three-equation eddy-viscosity model for Reynolds-averaged Navier–Stokes simulations of transitional flow / D.K. Walters, D. Cokljat // Journal of Fluids Engineering. – 2008. – Vol. 130, No. 12. – Art. 121401. – DOI: 10.1115/1.2979230.

Received: 10.11.2026
Accepted: 16.11.2026
Published: 28.11.2026

УДК 711.4+72.025+004.9

Reconstructing the lost architectural and planning structure of the historic centre of Margilan, Uzbekistan

Numonov Jasurbek Omonjon ogli
Doctoral researcher
Samarkand State Technical University
Republic of Uzbekistan, Samarkand
E-mail: jusurbeknumonov@gmail.com

Sulaymonov Omonjon Numonovich
Associate professor
Fergana state technical university
Republic of Uzbekistan, Fergana
E-mail: sulaymonovomonjon2@gmail.com

Реконструкция утраченной архитектурно-планировочной структуры исторического центра Маргилана, Узбекистан

Нумонов Жасурбек Омонжонович
докторант
Самаркандский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Самарканд

Сулаймонов Омонжон Нумонович
доц.
Ферганский государственный политехнический институт
Республика Узбекистан, г. Фергана

Abstract

The historic centre of Margilan, located in the Fergana Valley of Uzbekistan, represents a layered urban environment in which surviving monuments, traditional residential areas, market spaces and street networks provide evidence of long-term urban development. However, the architectural and planning structure of historic cities is often altered by road widening, redevelopment, changes in land use and the loss of traditional buildings. This paper proposes an integrated methodology for identifying and reconstructing lost or transformed components of Margilan's historic urban structure. The approach combines historical-cartographic analysis,

Библиографическое описание: Нумонов Ж.О., Сулаймонов О.Н. Реконструкция утраченной архитектурно-планировочной структуры исторического центра Маргилана, Узбекистан // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23740

For citation: Numonov J.O.O., Sulaymonov O.N. Reconstructing the lost architectural and planning structure of the historic centre of Margilan, Uzbekistan // Universum: Technical Sciences : electronic scientific journal. 2026. No. 11(152). Available at: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23740

georeferencing, GIS-based comparison, urban morphological analysis and a graded assessment of evidential reliability. Particular attention is paid to the distinction between documented features, probable spatial interpretations and hypothetical design assumptions. A conceptual five-stage workflow and a preliminary reliability model are presented. The paper does not claim to provide a completed empirical reconstruction: in the absence of a verified, georeferenced historical map corpus and systematic field survey, the proposed model should be treated as a research framework requiring calibration and validation. The methodology is intended to support evidence-based conservation and context-sensitive regeneration of the historic urban landscape.

Аннотация

Исторический центр Маргилана, расположенный в Ферганской долине Узбекистана, представляет собой многослойную городскую среду, в которой сохранившиеся памятники архитектуры, традиционные жилые кварталы, рыночные пространства и уличная сеть отражают длительный процесс градостроительного развития. Однако архитектурно-планировочная структура исторических городов часто подвергается изменениям в результате расширения дорог, реконструкции территорий, изменения функционального использования земель и утраты традиционной застройки. В данной статье предлагается комплексная методология выявления и реконструкции утраченных или трансформированных элементов исторической градостроительной структуры Маргилана. Предлагаемый подход объединяет историко-картографический анализ, геопривязку картографических материалов, сравнительный анализ с использованием геоинформационных систем (ГИС), исследование городской морфологии и дифференцированную оценку достоверности исходных данных. Особое внимание уделяется разграничению документально подтверждённых элементов, вероятных пространственных интерпретаций и гипотетических проектных предположений. Представлены концептуальная пятиэтапная схема исследования и предварительная модель оценки достоверности. Статья не претендует на завершённую эмпирическую реконструкцию: ввиду отсутствия верифицированного корпуса геопривязанных исторических карт и систематического натурного обследования предложенная модель рассматривается как исследовательская основа, требующая дальнейшей калибровки и проверки. Разработанная методология направлена на поддержку научно обоснованной охраны исторического наследия и контекстно ориентированной регенерации исторической городской среды.

Keywords: Margilan, historic urban landscape, urban morphology, historical cartography, GIS, architectural heritage, reconstruction.

Ключевые слова: Маргилан, исторический городской ландшафт, городская морфология, историческая картография, геоинформационные системы (ГИС), архитектурное наследие, реконструкция.

Introduction

Historic urban centres are not static collections of monuments. They are spatial systems formed through the interaction of streets, plots, building types, public spaces, infrastructure, social practices and landscape features. When individual buildings disappear or street alignments are

altered, the continuity of the urban fabric may be weakened even where prominent monuments remain. Consequently, the study of historic centres requires attention not only to landmark buildings but also to the relationships between buildings, plots, streets and public spaces.

Margilan is one of the historically significant cities of the Fergana Valley. Its architectural identity is associated with traditional residential environments, religious and educational complexes, craft production and market activity. The surviving Said Ahmad-Khoja Madrasah provides a documented example of a courtyard-based architectural ensemble in the city. Available descriptions identify its late nineteenth-century origins, courtyard arrangement, hujras, mosque and ayvan, as well as decorative and structural characteristics [1]. These elements are valuable for understanding local architectural traditions, but a single surviving monument cannot by itself explain the complete historical morphology of the urban centre.

The central research problem addressed here is methodological: how can the lost or transformed architectural and planning structure of Margilan be reconstructed without presenting uncertain interpretations as established historical facts? The paper therefore develops a transparent workflow in which each reconstructed feature is linked to its evidence, spatial accuracy and confidence level.

Literature review and conceptual background. Urban morphology examines the physical form of settlements through the relationships among streets, plots, building forms and blocks. Historical cartography is especially useful because successive maps can reveal changes in street structure, urban expansion and the persistence or disappearance of spatial elements. Pinho and Oliveira demonstrate how GIS-supported cartographic analysis can provide a systematic representation of urban-form evolution and enable comparison across historical periods [2].

Recent work on historical 3D city modelling further shows how georeferenced historical maps can be combined with present-day datasets and surviving building information. Morlighem, Labetski and Ledoux describe a workflow for reconstructing plausible historical building models while explicitly acknowledging uncertainty and the limitations of incomplete source maps [3]. This principle is relevant to Margilan: reconstruction should be understood as evidence-based interpretation, not as an attempt to produce a visually complete but unverifiable image of the past.

The Historic Urban Landscape approach promoted by UNESCO broadens conservation beyond isolated monuments and considers the wider urban context, including topography, spatial organization, social practices and intangible values [4]. For Margilan, this means that the reconstruction of historic structure should consider the connections between monuments, traditional neighbourhoods, bazaar areas, pedestrian routes and landscape infrastructure.

Materials and Methods

Research design and evidence categories. The proposed research uses a mixed historical-spatial design. It combines documentary analysis with geospatial processing and architectural field observation. Before any reconstruction is accepted, each item should be recorded in an evidence register containing its source, date, scale or resolution, spatial coverage, reliability and known limitations.

Table 1. Values

Evidence category	Examples	Analytical purpose
Historical cartography	City plans, cadastral maps, military/ topographic maps	Street alignments, block boundaries, former watercourses and urban extent
Written and visual records	Archival descriptions, photographs, travel accounts, inventories	Building functions, names, dates and changes in use
Surviving built heritage	Monuments, traditional houses, workshops, courtyard ensembles	Architectural typology, materials, proportions and construction logic
Current spatial data	Orthophotos, satellite images, cadastral data, field measurements	Current street/plot geometry and comparison with earlier conditions
Oral and intangible evidence	Local place names, craft traditions, community recollections	Interpretation of use, social meaning and vanished activity areas

Historical-cartographic analysis and georeferencing

Historical maps should first be inventoried and assessed for date, scale, cartographic projection, completeness and legibility. Where a map has sufficient control points, it can be georeferenced to a modern coordinate system using stable features that are likely to have persisted, such as major religious complexes, long-established road junctions or other identifiable landmarks. The transformation method and residual error should be recorded. Maps with substantial distortion should not be treated as metrically precise; they may still provide qualitative evidence about relative spatial relationships.

After georeferencing, historical and contemporary layers can be compared in a GIS environment. The comparison should identify persistent street segments, modified alignments, vanished paths, altered block boundaries, former water channels and changes in the footprint of significant buildings. The analysis should retain the original map image alongside the interpreted vector layer so that later researchers can audit the reconstruction.

Urban morphological analysis. The morphological analysis should be conducted at several interconnected scales. At the city scale, the researcher examines the relationship between the historic centre and later urban expansion. At the district scale, the analysis focuses on street hierarchy, block structure and the location of public or commercial spaces. At the plot and building scales, it examines plot depth and frontage, courtyard organization, building placement, access patterns, height and roof form. These dimensions should be recorded consistently so that changes between periods can be compared.

Table 2. Values

Scale	Key variables	Potential outputs
City / centre	Urban boundary, main routes, relation to landscape	Historic growth structure and major connections
District / block	Street hierarchy, block dimensions, public spaces	Morphological zones and transformation areas
Plot	Frontage, depth, subdivision, access	Plot continuity and parcel transformation
Building / ensemble	Footprint, courtyard, height, typology, materials	Building-type catalogue and conservation priorities

Reliability assessment

A reconstruction should not assign the same confidence to all mapped features. The proposed classification distinguishes high, medium and low confidence. High-confidence features are supported by several independent sources and, where possible, physical evidence. Medium-confidence features are supported by partial source agreement and a plausible spatial relationship. Low-confidence features depend on a single ambiguous source or on analogy with other buildings and therefore require further verification.

For comparative assessment, a preliminary weighted index may be used:

$$R = 0,25H + 0,20I + 0,25G + 0,20A + 0,10M$$

where H represents historical documentation, I the consistency of independent sources, G geographic and cartographic consistency, A archaeological or physical evidence, and M consistency with surviving architecture. Each component may be scored on a normalized 0–1 scale. The coefficients are provisional and are included to demonstrate the structure of the model; they must be tested through expert assessment and empirical calibration before the index is used for formal decision-making.

Five-stage reconstruction workflow. The workflow is iterative rather than strictly linear. New field observations may require correction of a georeferenced map, while an inconsistency between independent sources may lower the confidence assigned to a reconstructed feature. Each proposed reconstruction should therefore retain a record of its evidence and revision history.

Morphological interpretation framework for Margilan. The proposed framework treats Margilan's historic centre as a layered spatial system. Its analysis should begin with the identification of surviving heritage anchors and then examine the routes and urban spaces that historically connected them. The Said Ahmad-Khoja Madrasah is one such surviving anchor. Official heritage descriptions record its courtyard dimensions and the arrangement of rooms and mosque space around the courtyard [1]. These documented features can inform the typological analysis of courtyard-based ensembles, but they should not be used to infer the exact location or dimensions of lost neighbourhood buildings without additional evidence.

The bazaar and craft-related environments should be studied as functional and social spaces as well as physical places. Market routes, workshop clusters, access points and connections to surrounding residential areas may be reconstructed only where maps, photographs, written sources or field evidence support such interpretations. Contemporary market activity should not automatically be treated as proof that the same spatial configuration existed in earlier periods.

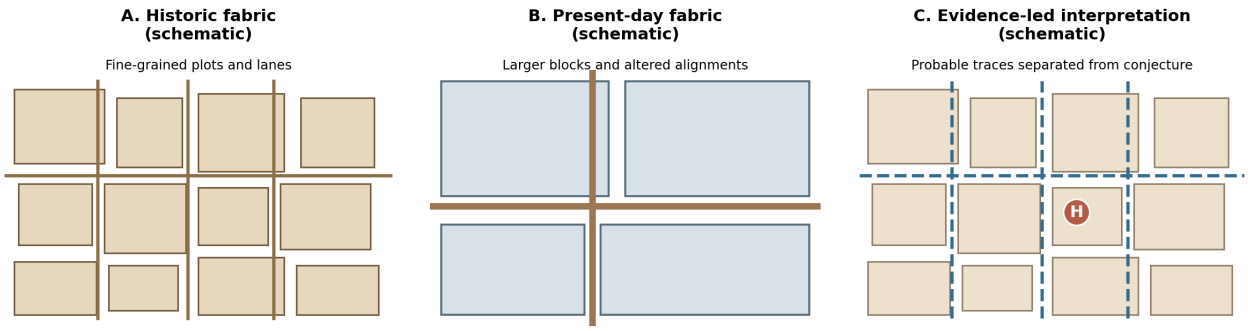


Figure 1. Schematic comparison of historic fine-grained fabric, present-day larger blocks and an evidence-led interpretation. This is an analytical illustration, not a historical map of Margilan

Table 3. Values

Analytical layer	Questions for the Margilan case	Required verification
Street network	Which routes persist, shift, widen or disappear?	At least two dated maps or one map plus independent documentary evidence
Blocks and plots	Where did subdivision or consolidation occur?	Cadastral/cartographic evidence and field checks
Courtyard ensembles	Which spatial principles survive in documented buildings?	Measured drawings, photographs and architectural survey
Public and commercial spaces	How did bazaar and craft spaces connect to neighbourhoods?	Historical descriptions, photographs, oral history and mapping
Water and landscape	Did channels, trees or open spaces shape movement and microclimate?	Historical maps, landscape traces and local documentation

Comparative perspective

International research offers transferable methods rather than ready-made historical answers. The GIS-based cartographic approach discussed by Pinho and Oliveira provides a model for comparing urban form across different periods [2]. The historical 3D reconstruction workflow developed by Morlighem and colleagues demonstrates how map-based evidence can be combined with present-day building data while documenting uncertainty [3]. The UNESCO Historic Urban Landscape recommendation supports an integrated approach that considers the wider urban setting and living heritage values [4].

For Margilan, these approaches should be adapted to the local context. The traditional courtyard house, mahalla-scale street network, craft production areas and water-related landscape elements require locally grounded typological categories. Direct transfer of European block models or conservation standards would risk overlooking the specific spatial logic of the Fergana Valley.

Planning and design implications. Once the historical evidence has been verified, the reconstructed structure can inform a set of context-sensitive planning measures:

- Protect surviving street alignments, historic plot patterns and pedestrian connections where their heritage value is documented.
- Prioritize repair and adaptive reuse of surviving traditional buildings rather than replacing them with stylistically imitative new construction.
- Use reconstructed routes and public-space relationships to improve pedestrian continuity between heritage sites, craft areas and market spaces.

• Where lost structures are interpreted with medium or low confidence, use contemporary but context-sensitive design rather than presenting conjectural replicas as authentic historic fabric.

• Introduce height, massing, frontage and material guidelines based on measured local examples and verified urban morphology.

• Integrate landscape and water-sensitive public-space strategies where historical and environmental evidence supports them.

A practical design output could be a layered heritage-management map showing (a) surviving historic fabric, (b) documented lost elements, (c) probable traces, (d) areas of major transformation and (e) zones where further survey is essential. Each layer should carry a confidence attribute and a source reference.

Discussion

The principal contribution of the proposed methodology is its emphasis on traceable evidence. In historic urban reconstruction, visual completeness can be misleading: a detailed plan may appear authoritative even when it is based on analogy or incomplete documentation. By separating documented, probable and hypothetical elements, the method makes uncertainty visible and allows conservation decisions to be proportionate to the available evidence.

The approach also has limitations. Historical maps may be incomplete, distorted or produced for administrative purposes rather than architectural documentation. Photographs often represent only selected viewpoints. Surviving buildings may have been altered, restored or reconstructed. Oral histories can preserve valuable knowledge but require careful contextualization and cross-checking. The reliability index proposed in this paper is conceptual and should not be interpreted as a validated quantitative instrument.

Most importantly, the present paper is a methodological proposal, not a completed empirical reconstruction of Margilan. A full case-study application requires the collection and georeferencing of historical maps, systematic documentation of surviving buildings, field verification of street and plot patterns, and transparent reporting of spatial errors.

Conclusion

This paper has proposed an integrated historical-cartographic and urban morphological methodology for reconstructing lost or transformed components of the historic centre of Margilan. The framework combines source inventory, georeferencing, GIS comparison, multi-scale morphological analysis and explicit confidence assessment. It places the reconstruction of streets, plots, blocks, courtyard ensembles, public spaces and landscape features within a broader historic urban landscape perspective.

The proposed five-stage workflow and preliminary reliability index provide a structured basis for subsequent empirical research. Their value will depend on the quality and diversity of the collected evidence and on validation through fieldwork and expert review. The next research stage should therefore establish a dated map corpus, prepare a georeferenced GIS database and conduct measured surveys of selected historic areas. Only after these steps can specific lost urban elements be reconstructed with defensible levels of confidence and translated into detailed design proposals.

References

1. Said Ahmadkhoja madrasa, Margilan. // Cultural Heritage Information System: [сайт] / Agency for Cultural Heritage of Uzbekistan(date of access: 13.11.2026). – 2026.
2. Dong, S. A study of historical urban landscape layering in Luoyang based on historical map translation / S. Dong, D. Shen // Land. – 2023. – Vol. 12, No. 3. – Art. 663.
3. Höftberger, K. Conservation and development: implementation of the historic urban landscape approach in Khiva, Uzbekistan / K. Höftberger // International Journal of Heritage Studies. – 2023. – Vol. 29, No. 4. – P. 314–328.
4. López González, C. Urban historiography and graphic reconstruction of a historic area in Valencia, Spain / C. López González, P.R. Orozco Carpio, C. Romaní López // Heritage. – 2024. – Vol. 7, No. 10. – P. 5547–5568.
5. Morlighem, C. Reconstructing historical 3D city models / C. Morlighem, A. Labetski, H. Ledoux // Urban Informatics. – 2022. – Vol. 1, No. 1. – DOI: 10.1007/s44212-022-00011-3.
6. Muminova, N.Z. The formation of the city of Margilan (Old Margilan) in the history of architecture / N.Z. Muminova // Educational Research in Universal Sciences. – 2024. – Vol. 3, No. 4. – P. 676–680.
7. Pinho, P. Cartographic analysis in urban morphology / P. Pinho, V. Oliveira // Environment and Planning B: Planning and Design. – 2009. – Vol. 36, No. 1. – P. 107–127.
8. Recommendation on the Historic Urban Landscape / UNESCO. – Paris: UNESCO, 2011(date of access: 01.11.2026).
9. Uhl, J.H. Combining remote-sensing-derived data and historical maps for long-term back-casting of urban extents / J.H. Uhl, S. Leyk, Z. Li [et al.] // Remote Sensing. – 2021. – Vol. 13, No. 18. – Art. 3672. – DOI: 10.3390/rs13183672.
10. Mu, P.Y. Simulating urban evolution by H-GIS and H-BIM: a temporal and spatial study of Pingjiang map / P.Y. Mu, S.E. Fraser, M. Peng // Heritage Science. – 2024. – Vol. 12. – Art. 392. – DOI: 10.1038/s40494-024-01507-8.

Received: 18.05.2026
Accepted: 03.11.2026
Published: 28.11.2026

УДК 624.012.45; 624.072.33; 624.04; 691.327/.328

Static and modal response of closed reinforced concrete frames with tightly fitted aerated-concrete infill: Tests, force-method analysis and nonlinear finite element modelling

Sanayeva Nargiza
Doctoral Researcher
(DSc), Samarkand State Technical University named after Mirzo Ulugbek
Uzbekistan, Samarkand
E-mail: sanayeva.nargiza.88@mail.ru

Khaydarova Kamola
senior Lecturer
Samarkand State University
Uzbekistan, Samarkand
E-mail: G-mail: xaydarovakamolaxakimovna@gmail.com

Статический и модальный отклик замкнутых железобетонных рам с плотно примыкающими заполнениями из ячеистого бетона: экспериментальные испытания, расчёт методом сил и нелинейное конечно-элементное моделирование

Санаева Наргиза Пайзуллаевна
докторант (DSc)
Самаркандский государственный технический университет им. Мирзо Улугбека
Республика Узбекистан, г. Самарканд

Хайдарова Камола
ст. преп
Самаркандский государственный университет
Республика Узбекистан, г. Самарканд

Abstract

Infill panels tightly adjoining reinforced concrete (RC) frames significantly affect their stiffness, load-bearing capacity, and natural vibration frequencies; however, this effect is insufficiently considered in standard design methods. This study investigates single-bay, closed RC frames at a 1:2 scale under proportionally increasing vertical and horizontal loads in three

Библиографическое описание: Санаева Н.П., Хайдарова К. Статический и модальный отклик замкнутых железобетонных рам с плотно примыкающими заполнениями из ячеистого бетона: экспериментальные испытания, расчёт методом сил и нелинейное конечно-элементное моделирование // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23702

For citation: Sanayeva N., Khaydarova K. Static and modal response of closed reinforced concrete frames with tightly fitted aerated-concrete infill: Tests, force-method analysis and nonlinear finite element modelling // Universum: Technical Sciences : electronic scientific journal. 2026. No. 11(152). Available at: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23702

configurations: without infill (B), with a panel made of non-autoclaved aerated concrete blocks bonded with adhesive without a gap (I), and with a central window opening occupying 16 % of the panel area (O). The bare frame was analyzed using the force method, while the infill panels were investigated using Mainstone's equivalent diagonal strut model. The solid infill panel increased the beam cracking load from 9.0 to 33.2 kN and carried at least 94.5 kN at each loading point while causing only minor damage to the frame. In contrast, the bare frame failed at a load of 45 kN. The presence of a window opening reduced the cracking load by 30 % and resulted in diagonal cracks developing from the corners of the opening. The continuum model reproduced the beam cracking load of 32.3 kN for Series I and showed that the infill panel carried 46–62 % of the vertical load. The diagonal strut model did not adequately represent the interaction between the infill panel and the frame under vertical loading. Furthermore, the solid infill increased the fundamental horizontal vibration frequency from 6.4 to 17.0 Hz and the vertical vibration frequency from 11.8 to 26.6 Hz. The window opening reduced both frequencies by 15–18 %.

Аннотация

Панели заполнения, плотно примыкающие к железобетонным (ЖБ) рамам, существенно влияют на их жесткость, несущую способность и собственные частоты колебаний, однако данный эффект недостаточно учитывается в нормативных методах расчета. В работе исследованы замкнутые однопролетные ЖБ рамы в масштабе 1:2 при пропорциональном увеличении вертикальных и горизонтальных нагрузок в трех вариантах: без заполнения (B), с панелью из неавтоклавных газоблоков, уложенной на клей без зазора (I), и с центральным оконным проемом площадью 16 % от площади панели (O). Расчет рамы без заполнения выполнен методом сил, а панели исследованы с применением эквивалентной диагональной связи по Мейнстоуну. Сплошная панель увеличила нагрузку трещинообразования в балке с 9,0 до 33,2 кН и обеспечила восприятие не менее 94,5 кН на каждую точку нагружения при незначительном повреждении рамы. При этом незаполненная рама разрушилась при нагрузке 45 кН. Наличие оконного проема снизило нагрузку трещинообразования на 30 % и обусловило образование диагональных трещин от его углов. Континуальная модель воспроизвела нагрузку трещинообразования в балке серии I (32,3 кН), а также показала, что панель воспринимает 46–62 % вертикальной нагрузки. Модель с диагональными связями не смогла адекватно отразить совместную работу заполнения и рамы при действии вертикальной нагрузки. Установлено также, что сплошное заполнение повысило основную частоту горизонтальных колебаний с 6,4 до 17,0 Гц, а вертикальную — с 11,8 до 26,6 Гц. Оконный проем снизил обе частоты на 15–18 %.

Keywords: window opening, equivalent diagonal strut, frame–panel interaction, natural frequency, pushover analysis, cracking load, seismic design.

Ключевые слова: оконный проем, эквивалентная диагональная связь, взаимодействие рамы и панели, собственная частота, pushover-анализ, нагрузка трещинообразования, сейсмическое проектирование.

1. Introduction

Moment-resisting reinforced concrete (RC) frames with masonry infill are the dominant structural system for residential, public and industrial buildings in Central Asia. The infill panels — fired brick, lightweight concrete or aerated-concrete blocks — are normally designed as non-structural partitions: their weight is applied to the beams, and their stiffness and strength are ignored. Once a panel is in contact with the surrounding frame, however, it acts as a compression strut, stiffens the frame several times, reduces its lateral drift and redistributes internal forces between columns and beams [1–3]. It also shortens the natural periods of the structure, which governs the seismic forces it attracts [4,5].

In Uzbekistan this question has direct practical weight, because residential construction is expanding rapidly and most of the country lies in zones of design seismicity 7–9 on the MSK-64 scale. The seismic code QMQ 2.01.03 – 19 [6] distinguishes between infill that participates in the seismic response of a frame and infill that does not. Infill that is not intended to participate must be separated from the load-bearing members by an elastic gap of at least 20 mm; infill that does participate must be treated as a diaphragm and reliably connected to the columns and beams. The code, however, gives no procedure for quantifying that participation. Lightweight aerated-concrete blocks laid in thin-bed adhesive directly against the frame are now widely used, and the gap is frequently omitted in practice, so the frame–infill interaction is present whether or not the designer accounts for it.

The equivalent-strut concept was put on an analytical footing by Stafford Smith, who related the width of the diagonal compression band to the relative stiffness of frame and panel [7]. Mainstone [8] calibrated the strut width on tests of infilled frames; his expression is adopted by FEMA 306 [9] and ASCE/SEI 41 [10], and the strut idealisation underlies the infill provisions of Eurocode 8 [11]. Macro-models of this type and finite element micro-models, which resolve units, joints and interfaces explicitly, have been reviewed by Asteris et al. [12,13]. Crisafulli [14] showed that when frame and infill are in full contact the infill becomes a primary load-carrying element and that a gap changes the load path fundamentally. Kim and Yu [2] confirmed this on four infilled and one bare portal frame: a construction gap reduced strength by 75–80 % and stiffness by 55–70 %, and code equations underestimated the measured peak strength by up to 70 %, mainly because they neglect frictional shear resistance. Sen et al. [1] found that infill increased the lateral stiffness, strength and energy dissipation of RC frames under cyclic lateral load with constant gravity load. El-Kholy et al. [15] combined plastic hinges with an equivalent strut in pushover analyses and stressed the joint role of infill, gravity load and frame–infill interaction, and Murty and Jain [16] reported the beneficial influence of infill on the seismic performance of RC frame buildings. Under vertical load, Brodsky and co-workers showed that the infill can restrain the frame and delay progressive collapse after the loss of a supporting column [17,18].

Openings reduce both stiffness and strength. Mondal and Jain [19] showed that the initial lateral stiffness of an infilled RC frame decreases as the ratio of opening area to panel area increases and proposed a reduction factor on the strut width. Kakaletsis and Karayannis [20] found experimentally that the shape and position of an opening affect strength, stiffness and ductility, and that cracking begins at the opening corners. Todorovic et al. [21] reported limited deformation

capacity of autoclaved aerated-concrete (AAC) infill walls with a door opening. On the dynamic side, Ricci et al. [4] and Asteris et al. [5] showed that infill shortens the elastic period of RC frame buildings substantially and that openings and infill distribution govern the reduction.

Most of these studies apply lateral load under constant gravity load. Few examine combined, proportionally increasing vertical and lateral loading, which governs beam cracking in gravity-dominated low-rise frames; fewer still address non-autoclaved aerated-concrete infill bonded with adhesive, and none, to the author's knowledge, relates the static tests of such frames to their modal properties. This study addresses that gap. Its aims are (I) to quantify, on identical half-scale closed RC frames, the effect of a tightly fitted aerated-concrete-block infill, with and without a central window opening, on cracking, crack pattern and load-bearing capacity under combined loading; (II) to assess the force-method and Mainstone-strut predictions used in design practice; (III) to explain the differences with nonlinear finite element models in which the infill is represented either by struts or by a continuum in contact with the frame; and (iv) to quantify the effect of the infill and the opening on the natural frequencies and mode shapes of the frame. Preliminary results for series B and I were reported in Uzbek; this paper adds series O, a verified force-method solution, the nonlinear static and modal analyses and a comparison of all three series.

2. Materials and methods

2.1. Specimens and materials

Three series of half-scale, single-storey, single-bay closed RC frames were manufactured with identical geometry and reinforcement (**Figure 1**, **Table 1**). The frames form a closed contour whose bottom beam was anchored to the strong floor. The axial span is 2300 mm and the axial height of the columns 1550 mm; all members have a 200 × 200 mm cross-section. The columns are reinforced with 6Ø10 longitudinal bars and Ø4 mm ties; the top beam has 3Ø10 bars in the tension zone, 2Ø8 bars in the compression zone and Ø4 mm stirrups. The frames were cast from concrete of compressive strength class B25 and reinforced with class A400 bars. The compressive strength of the concrete and the yield strength of the reinforcement were determined in accordance with the relevant GOST standards; the analyses below use the design values of the classes.

After the frames had reached their design strength, the infill was laid inside the clear opening of 2100 × 1350 mm. Series I has a solid panel; series O has a central window opening of 700 × 650 mm (width × height), i.e. A_o/A_{inf} = 0.455/2.835 = 0.16. The panels were built of non-autoclaved aerated-concrete blocks of density grade D500 and strength class B2.0, scaled to 300 × 150 × 100 mm, laid flat to give a 150 mm thick wall and bonded with thin-bed adhesive to each other and to the beams and columns, with no gap at the frame interface. The guaranteed compressive strength of class B1.5 is 1.5 MPa. Series I and O each comprised three nominally identical specimens; the loads reported in Section 3 are the values recorded for each series.

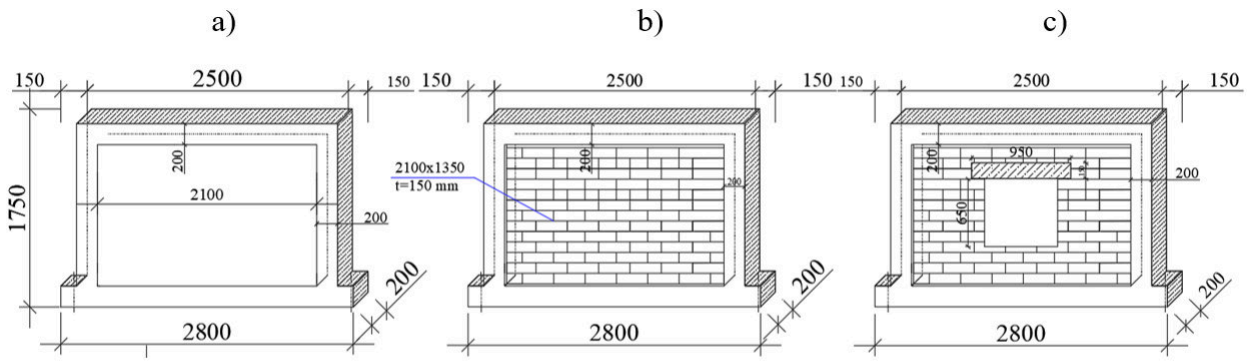


Figure 1. Test specimens (dimensions in mm)

(a) Bare closed frame, series B; (b) solid infill, series I; (c) infill with a central window opening, series O.

Table 1. Test matrix and material properties

Item	Series B	Series I	Series O
Infill	none	D500/B1.5 blocks, t = 150 mm, adhesive, no gap	as series I
Opening (A_o/A_{inf})	—	—	700 × 650 mm, central (0.16)
Concrete / reinforcement	B25 / A400	B25 / A400	B25 / A400
E_c / f_c / f_t (design), MPa	30 000 / 25 / 2.1	30 000 / 25 / 2.1	30 000 / 25 / 2.1
Infill f_m / E_m / f_{tm}, MPa	—	2.0 / 1100 / 0.25	2.0 / 1100 / 0.25

$E_m = 550 f_m$ following ASCE/SEI 41 [10]; $f_{tm} = f_m/8$ (assumed).

2.2. Test set-up and loading

The specimens were tested under static loading at an age of 28 days in a purpose-built rig. The vertical load was applied by a 250 kN hydraulic jack through a spreader beam to two points on the top beam, 730 mm from each joint, and the lateral load by a 50 kN jack at the right beam–column joint. P denotes the vertical force at each of the two load points and H the lateral force. Both loads were increased in steps, approximately in proportion: the ratio P/H stayed between 1.8 and 2.2 throughout, with a mean of about 2.1. Beam deflection and lateral displacement were measured with dial gauges of 0.01 mm resolution, and crack formation and propagation were mapped at every load step.

2.3. Force-method analysis of the bare frame

Because the bottom beam is anchored to the strong floor, the bare frame is idealised as a portal frame fixed at both column bases (**Figure 2**). It is three times statically indeterminate. The primary system is obtained by cutting the top beam at mid-span, with the redundants X_1 (axial force), X_2 (shear force) and X_3 (bending moment) acting at the cut. The canonical equations are

$$\delta_{11} X_1 + \delta_{12} X_2 + \delta_{13} X_3 + \Delta_{1P} = 0, \quad (1)$$

$$\delta_{21} X_1 + \delta_{22} X_2 + \delta_{23} X_3 + \Delta_{2P} = 0, \quad (2)$$

$$\delta_{31} X_1 + \delta_{32} X_2 + \delta_{33} X_3 + \Delta_{3P} = 0. \quad (3)$$

The flexibility coefficients and load terms were evaluated by Mohr's integral, $\int \bar{M}_i \bar{M}_j dx/EI$, using Simpson's rule; EI is the same for all members and cancels from the solution. **Table 2** lists them for $P_1 = P_2 = 45$ kN and $P_3 = 22$ kN, the loads at failure of the bare frame. Because the unit diagram $\bar{M}_2$ is antisymmetric and $\bar{M}_1$, $\bar{M}_3$ are symmetric, $\delta_{12} = \delta_{23} = 0$ and Equation (2) uncouples. The sum of all unit coefficients, $\Sigma\delta = 17.79/EI$, agrees with the integral of the squared summary unit diagram, and the coefficients were also verified by an independent direct-stiffness analysis of the same frame.

Table 2. Flexibility coefficients and load terms (multiplied by EI; units m, kN)

Term	Value	Term	Value
δ_{11}	2.483	Δ_{1P}	106.23
δ_{22}	5.114	Δ_{2P}	−30.39
δ_{33}	5.400	Δ_{3P}	152.24
$\delta_{13} = \delta_{31}$	2.403	$\delta_{12} = \delta_{23}$	0

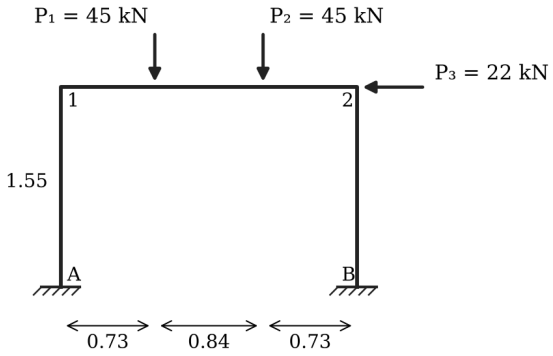


Figure 2. Analytical model of the bare frame at the failure load (dimensions in m)

Solving gives $X_1 = -27.23$ kN, $X_2 = 5.94$ kN and $X_3 = -16.08$ kN·m. The final diagrams, $M = M_P + \Sigma \bar{M}_i X_i$, are shown in **Figure 3**. The largest moment, 23.61 kN·m, occurs at the left beam–column joint (tension on the top face of the beam), and the largest sagging moment, 18.57 kN·m, under the right-hand load point. The left column carries the larger axial force (−50.94 kN) and shear (27.23 kN). Equilibrium is satisfied: $\Sigma X = 27.23 - 5.23 - 22 = 0$ and $\Sigma Y = 50.94 + 39.06 - 90 = 0$.

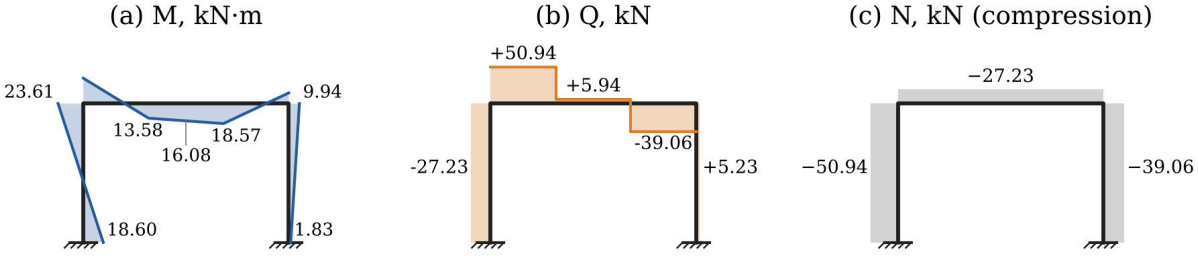


Figure 3. Internal forces in the bare frame at $P_1 = P_2 = 45$ kN and $P_3 = 22$ kN

(a) Bending moment, drawn on the tension side; (b) shear force; (c) axial force.

The theoretical cracking load P_{crc} and load-bearing capacity P_u of the bare frame were obtained by scaling these internal forces linearly with the load until the moment in the governing section reached the cracking moment and the ultimate moment of the RC section, respectively, both calculated according to ShNK 2.03.01 – 96 for the B25 concrete and A400 reinforcement of the specimens.

2.4. Equivalent-strut model of the infilled frames

For series I the panel is replaced by a pin-ended diagonal strut acting in compression only, working in parallel with the RC frame as a dual system [9]. The strut length d and inclination θ follow from the clear panel dimensions l′ = 2100 mm and h′ = 1350 mm:

$$d = \sqrt{l'^2 + h'^2} = 2497\ mm, \qquad \theta = \arctan\frac{h'}{l'} = 32.7^\circ. \tag{4}$$

The strut width is given by Mainstone's expression as adopted in FEMA 306 and ASCE/SEI 41 [8–10]:

$$w = 0.175\ d\ (\lambda_1 h_{col})^{-0.4} \tag{5}$$

where h_{col} = 1550 mm is the column height between beam axes and λ_1 is the relative stiffness of panel and frame:

$$\lambda_1 = \left[\frac{E_m t\ \sin 2\theta}{4 E_c I_c h'}\right]^{1/4} \tag{6}$$

With E_c = 30 000 MPa, $I_c = 200^4/12 = 1.333\cdot10^8$ mm^4, t = 150 mm and E_m = 1100 MPa, λ_1 = 1.62 m^{-1}, $\lambda_1 h_{col}$ = 2.52 and w = 302 mm (w/d = 0.12). The capacity of the infilled frame was obtained by superposing the resistances of the frame and the strut, with the strut force limited by crushing of the panel, $R = w\cdot t\cdot f_m$; the cracking loads were obtained for the frame–infill interface and for the beam.

An opening interrupts the diagonal compression band. For series O the strut width was multiplied by the reduction factor of Al-Chaar, which depends on the ratio $\alpha = A_o/A_{inf}$ of opening area to panel area:

$$w_o = \rho\ w, \qquad \rho = 0.6\alpha^2 - 1.6\alpha + 1 = 0.76. \tag{7}$$

2.5. Nonlinear finite element models

To trace the response through cracking and yielding, and to test whether the strut idealisation itself limits the predictions, nonlinear static analyses were run in OpenSees. The same frame model was combined with three representations of the panel (**Table 3**).

Frame. Columns and beam were modelled with displacement-based beam-column elements with fibre cross-sections (20 concrete layers, discrete bars) and five Gauss–Lobatto integration points, 70–420 mm long, with P-Δ effects in the columns. Concrete followed the Concrete02 law

with linear tension softening, and the reinforcement the Menegotto–Pinto law (Steel02). The bottom beam was assumed rigidly anchored, so the column bases were fixed, as in Section 2.3. Shear deformation and bond slip of the reinforcement were not modelled.

Strut model (S). The Mainstone strut of Section 2.4 was modelled by two pin-ended truss elements along the frame diagonals with a compression-only law (Concrete01). For series O the strut area was multiplied by $\rho = 0.76$.

Continuum model (C). The panel was discretised into 4-node plane-stress elements, 70–350 mm in size and 150 mm thick, with the opening of series O left void. The aerated concrete was described by the ASDConcrete3D damage-plasticity material of OpenSees with mesh-size regularisation of the fracture energy and IMPL-EX integration. Each boundary node of the panel was connected to the frame, or to the anchored bottom beam, by two zero-length springs: normal to the interface, an elastic no-tension spring, so that the adhesive joint transmits compression but can open; tangential, an elastic–perfectly plastic spring with a shear strength of 0.15 MPa over the tributary area, the EN 1996-1-1 initial shear strength of AAC masonry with general-purpose mortar. Thin-bed adhesive generally bonds better than that, so a second analysis with full bond (panel nodes tied to the frame) bounds the effect of this assumption.

Loading and solution. Self-weight was applied first. The two vertical loads P and the lateral load $H = 0.489P$ (the ratio 22/45 of the tests) were then increased proportionally under displacement control of the beam mid-span, switching to control of the lateral displacement where needed to pass limit points. Newton iterations with Krylov, line-search and modified-Newton fall-backs and adaptive sub-stepping were used. First cracking of a frame member was taken as the load at which the extreme concrete fibre reached the tensile strength, first yield as the load at which a bar reached f_y/E_s, cracking and crushing of the panel as the loads at which the principal stress at any integration point reached $0.95f_{tm}$ or $-0.95f_m$, and opening of the interface as a normal separation of 0.05 mm.

2.6. Modal analysis

The natural frequencies and mode shapes of the five models (B; I and O with strut and continuum panels) were computed from the initial tangent stiffness after self-weight had been applied, so that the interface springs of model C were closed. Masses were lumped at the nodes from a density of 2500 kg/m^3 for the RC members and 500 kg/m^3 for the D500 panel; in the strut models, which have no panel nodes, half of the panel mass was lumped on the top beam. Two mass cases were considered: self-weight only (sw), and self-weight plus the mass of the test gravity load, 45 kN/g = 4.59 t at each of the two load points (sw+P), which represents the floor mass carried by the frame. The generalised eigenvalue problem was solved with the full LAPACK solver.

3. Results

3.1. Experimental behaviour

Series B. Up to P = 6.25 kN (H = 3.4 kN) the bare frame behaved elastically and no cracks were observed. The first flexural cracks formed at P = 9.0 kN (H = 4.5 kN) in the tension zones of the top beam. With further loading, cracks developed along the beam and around the beam–column

joints and then appeared in the columns, and the response became non-linear. Most cracks formed at the top face of the beam near the joints, at the bottom face near mid-span and in the joint regions, consistent with the moment diagram of. The frame failed at P = 45 kN and H = 22 kN.

Series I. Frame and panel worked as a single system from the start of loading. No cracks were observed up to P = 14.3 kN (H = 6.8 kN). The first cracks appeared along the adhesive joint at the interface with the top beam and columns at P = 23.8 kN (H = 11 kN), and the first flexural crack in the beam at P = 33.2 kN (H = 16 kN). Once the interface had cracked, part of the load was redistributed to the frame, and cracks developed along the beam, around the joints and across the panel. In the final stage the crack density increased in the upper part of the panel near the frame, but no significant damage to the RC beam or columns was recorded. Loading ended at P = 94.5 kN and H = 45 kN, close to the 50 kN capacity of the lateral jack, without disintegration of the panel or brittle failure of the frame; this load is therefore a lower bound of the capacity of series I.

Series O. The opening altered the cracking sequence. The first crack formed in the panel at the corners of the opening at H = 4.5 kN, and a horizontal crack followed at H = 6.8 kN. As the load increased, cracks spread from the opening corners towards the upper and side parts of the panel. The first flexural crack in the beam appeared at P = 23.25 kN (H = 11 kN). Diagonal cracks then developed from the opening corners towards the frame joints, accompanied by local separation and crushing of blocks in the piers beside the opening. No abrupt failure of the RC members was observed; loading ended at the same level as for series I, P = 94.5 kN and H = 45 kN, which is again a lower bound of the capacity.

3.2. Force-method and strut predictions

Table 3 and Figure 4 compare the predicted and measured loads. For the bare frame the force-method model reproduces both the cracking load (9.65 kN against 9.0 kN, ratio 1.07) and the capacity (43 kN against 45 kN, ratio 0.96). For series I the strut model predicts first cracking at the frame–infill interface at 15 kN (test: 23.8 kN) and in the beam at 22 kN (test: 33.2 kN), and a capacity of 73.2 kN; for series O it predicts a beam cracking load of 16.5 kN and a capacity of 63.64 kN. Because loading of series I and O ended without failure, the capacity ratios of these series are upper bounds.

Table 3. Predicted and measured loads P (kN)

Quantity	Series B	Series I	Series O
P_u, theory	43.0	73.2	63.64
P_u, test	45.0	≥ 94.5	≥ 94.5
$P_{u,th} / P_{u,exp}$	0.96	≤ 0.77	≤ 0.67
P_{crc} (beam), theory	9.65	22.0	16.5
P_{crc} (beam), test	9.0	33.2	23.25
$P_{crc,th} / P_{crc,exp}$	1.07	0.66	0.71

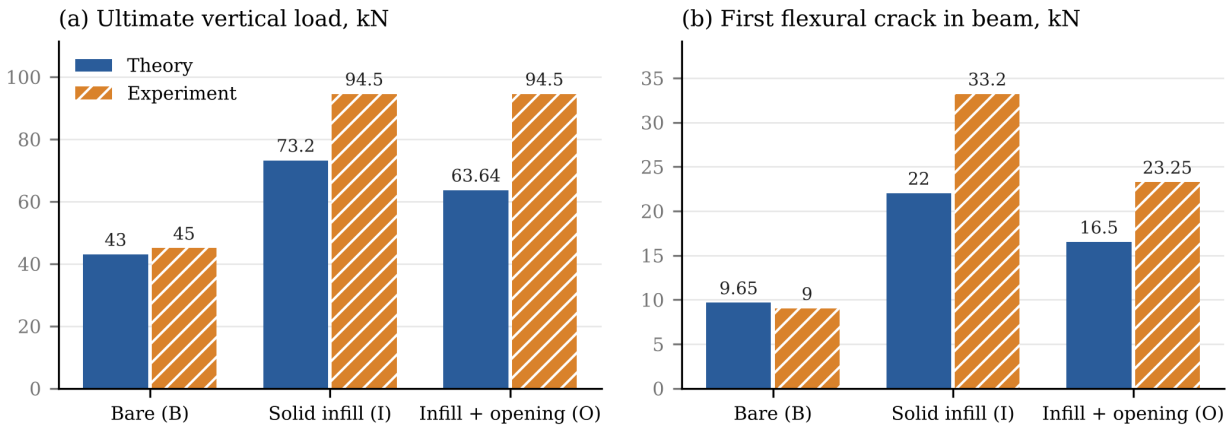


Figure 4. Predicted and measured loads

(a) Load-bearing capacity; for series I and O the experimental value is the maximum load applied, without failure. (b) First flexural cracking of the beam.

In the tests the panel increased the beam cracking load 3.7 times (33.2/9.0) and the load carried at least 2.1 times (94.5/45). The strut model predicts increases of 2.28 (22/9.65) and 1.70 (73.2/43): the right direction, but a markedly smaller magnitude. The opening reduced the beam cracking load by 30 % in the tests (33.2 → 23.25 kN) and by 25 % in the model (22 → 16.5 kN).

3.3. Nonlinear finite element response

Figure 5 summarise the nonlinear finite element results, Figure 6 shows the bending moments in the frame, and Figure 7 the compressive stress field in the panel. For the bare frame the fibre model gives a capacity of 41.0 kN (0.91 of the test value), with first yielding of the top bars at the left beam–column joint at 26.2 kN followed by redistribution to the beam span and the column bases — the same sequence of cracking regions as in the test. The predicted first cracking load (6.3 kN, including self-weight) is lower than the observed 9.0 kN, as expected for a criterion based on the first fibre reaching the tensile strength, whereas a visible crack requires some opening.

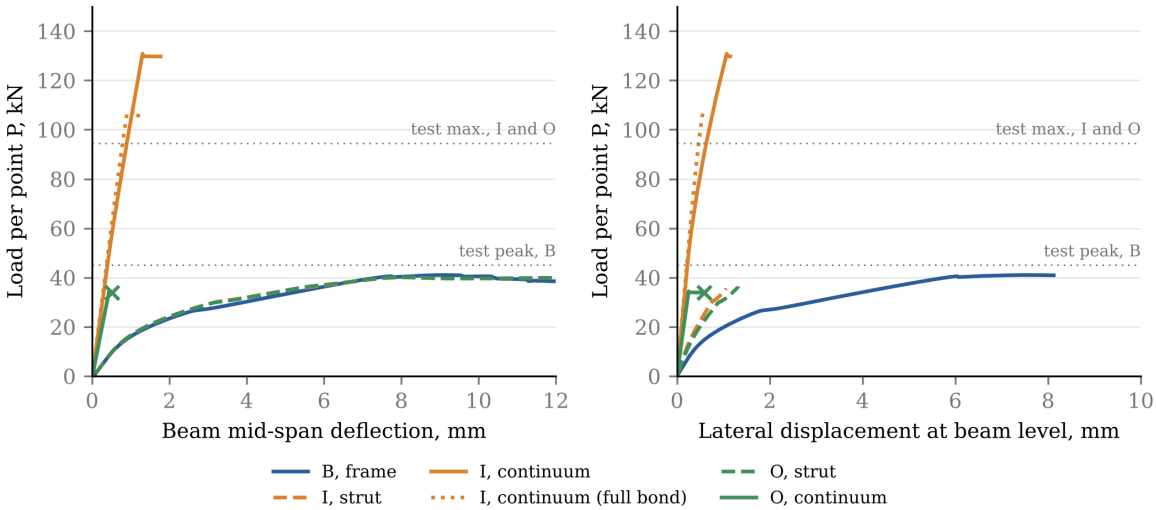


Figure 5. Load–displacement response of the finite element models

(a) Beam mid-span deflection; (b) lateral displacement at beam level. Dotted lines: failure load of series B and maximum load applied to series I and O; × – end of the converged analysis of series O.

Strut model. With the strut connected to the beam–column joints, the predicted capacity of the infilled frames (40.6 kN for both series I and O) is practically that of the bare frame. The strut stiffens the frame laterally — the lateral displacement at a given load is about five times smaller (Figure 5b) — but it does not support the beam between the joints, so the beam mechanism under the two vertical loads governs as in the bare frame.

Continuum model. When the panel is modelled as a continuum in contact with the frame, the beam bears on the panel along its length and the frame and panel act as a composite wall-beam. In this respect the panel acts as an elastic foundation for the beam, a problem whose static and dynamic aspects have been studied experimentally and analytically for beams on deformable bases. The column reactions show that the panel transfers 46 % of the vertical load directly to the anchored bottom beam at P = 45 kN and 62 % at P = 94.5 kN; the columns carry the rest. The compressive stresses are nearly vertical under the load points and fan out towards the joints (Figure 7a,b); their peak at P = 94.5 kN is 0.92 MPa, less than half of f_m. The model reproduces the beam cracking load of series I (32.3 kN against 33.2 kN; 34.4 kN with full bond). At P = 45 kN the largest moment in the frame is 5.3 kN·m, about a quarter of the 20.3 kN·m in the bare frame at the lower load of 40 kN, and at P = 94.5 kN it is still only 10.5 kN·m with all reinforcement elastic (Figure 6), which agrees with the absence of significant damage to the RC members in the test. Yielding of the reinforcement, crushing of the panel under the beam and cracking of the panel all start at about 130 kN (107 kN with full bond).

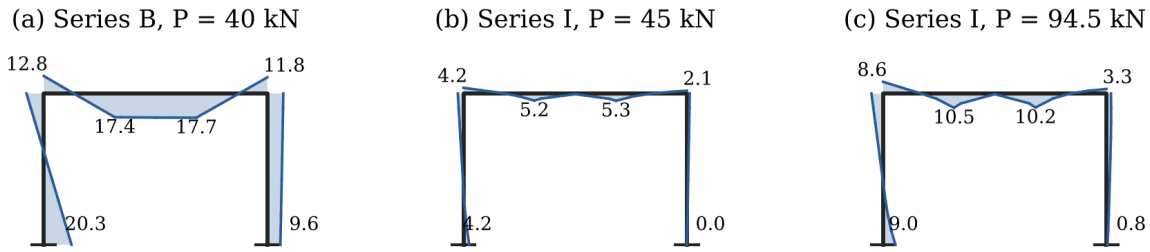


Figure 6. Bending moments in the RC frame from the finite element analysis (kN·m, drawn on the tension side)

(a) Bare frame at P = 40 kN; (b) solid-infill frame, continuum model, at P = 45 kN; (c) the same at P = 94.5 kN.

Series O. The continuum model reproduces the lower beam cracking load of series O (24.5–26.9 kN against 23.25 kN). In the full-bond model the first panel cracks form at the upper edge of the opening near its corner; with the interface model they form near the top beam, where the interface opens at 33.9 kN. After local crushing at the top-left contact zone and near the opening the analysis lost convergence at 34–49 kN, well below the 94.5 kN carried in the test (Figure 7c). With the mesh used here, the strain localisation at the re-entrant corners could not be traced, so the model does not provide a capacity for series O.

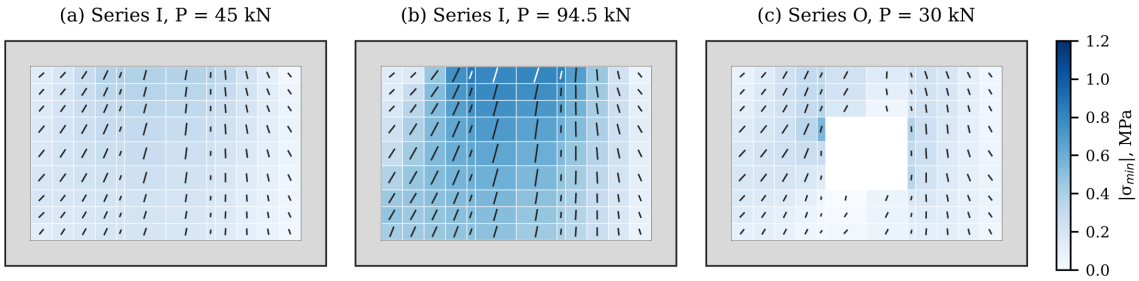


Figure 7. Minimum principal (compressive) stress in the panel from the continuum model with interface springs

(a) Series I at P = 45 kN; (b) series I at P = 94.5 kN; (c) series O at P = 30 kN. Ticks show the direction of the compressive principal stress; the panel is drawn inside the frame contour.

3.4. Natural frequencies and mode shapes

Table 4 lists the frequencies of the fundamental sway mode and of the first vertical (beam) mode, and Figure 8 shows the corresponding mode shapes for the sw+P mass case. With self-weight only, the frequencies are high (34.5 Hz in sway for the bare half-scale frame) because the moving mass is small; with the mass of the test gravity load they fall to the range of a loaded floor, and the differences between the models become clear.

Table 4. Natural frequencies of the frames (Hz)

Model	Sway, sw	Vertical, sw	Sway, sw+P	Vertical, sw+P	T_1 (sw+P), s
B, bare frame	34.5	88.2	6.4	11.8	0.157
I, strut model	46.7	70.8	10.1	11.8	0.099
O, strut model	43.9	72.5	9.4	11.8	0.107
I, continuum model	81.1	171.7	17.0	26.6	0.059
O, continuum model	66.9	146.9	13.9	22.7	0.072

sw – self-weight masses; sw+P – plus the mass of the test gravity load (2 × 4.59 t at the load points); T_1 – fundamental period.

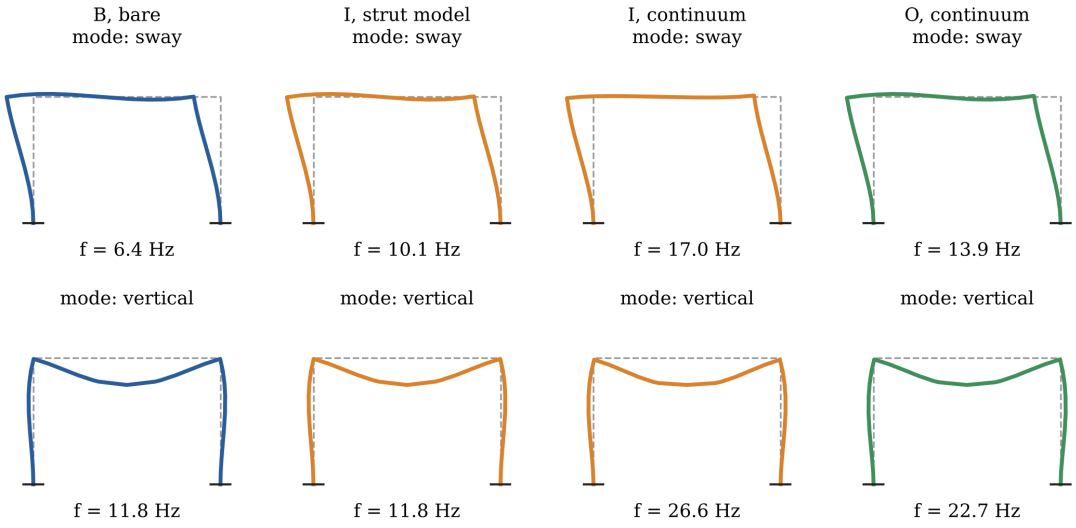


Figure 8. Fundamental sway mode and first vertical mode of the frames for the sw+P mass case

Columns: bare frame; solid infill, strut model; solid infill, continuum model; infill with opening, continuum model. Dashed lines: undeformed frame.

With the gravity-load mass, the solid panel raised the sway frequency from 6.4 to 17.0 Hz (2.7 times; lateral stiffness about 7 times) and the vertical frequency from 11.8 to 26.6 Hz (2.3 times). The opening lowered these frequencies to 13.9 and 22.7 Hz, by 18 % and 15 %, which corresponds to a loss of about one-third of the lateral stiffness of the solid-infill frame. The strut models raise the sway frequency only to 10.1 Hz (series I) and 9.4 Hz (series O) and leave the vertical frequency unchanged at 11.8 Hz, because the struts do not support the beam between the joints. The mode shapes confirm this: in the strut and bare models the vertical mode is a free flexural mode of the beam, whereas in the continuum models the beam deflection is restrained by the panel and the columns participate.

4. Conclusions

1. A non-autoclaved aerated-concrete-block panel laid in adhesive without a gap acts structurally with a closed RC frame under combined vertical and lateral loading. It delayed cracking of the beam 3.7 times and allowed the frame to carry at least twice the failure load of the bare frame with damage concentrated in the panel; the RC members remained essentially undamaged.

2. The interaction is governed by the frame–infill interface: cracking begins there because of the large stiffness mismatch, and a model that allows the interface to open but transmit compression reproduced the beam cracking load within 3 %.

3. The Mainstone strut, as used in design, represents the lateral stiffening but not the gravity load path into the panel. It therefore underestimates the strength of tightly fitted infilled frames under combined loading and, in modal analysis, underestimates the sway frequency and misses the stiffening of the vertical mode entirely.

4. A central opening of 16 % of the panel area mainly affects cracking and stiffness: it lowered the beam cracking load by 30 %, the natural frequencies by 15–18 % and the lateral stiffness by about one-third, and it localised damage at the opening corners.

References

1. Sanayeva, N.P. The Importance of Infill Materials in Reinforced Concrete Frames of Multi-Storey Residential Buildings / N.P. Sanayeva // Proceedings of the Republican Scientific and Practical Conference «Innovative Ideas, Integration and Economy in the Field of Construction and Architecture». – 2025. – Vol. 2. – P. 155–158.
2. Sanaeva, N.P. Stress-strain state characteristics of closed reinforced concrete frames considering infill wall effects / N.P. Sanaeva // Journal of Transport. – 2026. – Vol. 3, No. 3. – P. 282–286. – DOI: 10.56143/2181-2438-2026-3-282-286.
3. Usmanov, V.F. The Influence of External Walls on the Behavior of Frame Structures as Infill Walls / V.F. Usmanov, N.P. Sanaeva // Scientific Journal of Construction and Education. – 2026. – No. 2. – P. 17–22.
4. Ricci, P. Analytical investigation of elastic period of infilled RC MRF buildings / P. Ricci, G.M. Verderame, G. Manfredi // Engineering Structures. – 2011. – Vol. 33, No. 2. – P. 308–319. – DOI: 10.1016/j.engstruct.2010.10.009.

5. Asteris, P.G. Parameters affecting the fundamental period of infilled RC frame structures / P.G. Asteris, C.C. Repapis, A.K. Tsaris [et al.] // Earthquakes and Structures. – 2015. – Vol. 9, No. 5. – P. 999–1028. – DOI: 10.12989/eas.2015.9.5.999.
6. Construction in Seismic Regions: KMK 2.01.03–19: regulatory document. – Tashkent, 2019. – (In Uzbek).
7. Stafford Smith, B. Behavior of square infilled frames / B. Stafford Smith // Journal of the Structural Division. – 1966. – Vol. 92, No. 1. – P. 381–403.
8. Mainstone, R.J. On the stiffnesses and strengths of infilled frames / R.J. Mainstone // Proceedings of the Institution of Civil Engineers. – 1971. – P. 57–90.
9. Evaluation of earthquake damaged concrete and masonry wall buildings: basic procedures manual: FEMA 306 / Federal Emergency Management Agency. – Washington, DC: FEMA. – 1998.
10. Seismic evaluation and retrofit of existing buildings: ASCE/SEI 41–17 / American Society of Civil Engineers. – Reston, VA: ASCE. – 2017.
11. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings: EN 1998–1:2004 / European Committee for Standardization. – Brussels: CEN, 2004.
12. Asteris, P.G. Mathematical macromodeling of infilled frames: state of the art / P.G. Asteris, S.T. Antoniou, D.S. Sophianopoulos, C.Z. Chrysostomou // Journal of Structural Engineering. – 2011. – Vol. 137, No. 12. – P. 1508–1517.
13. Asteris, P.G. Mathematical micromodeling of infilled frames: state of the art / P.G. Asteris, D.M. Cotsovos, C.Z. Chrysostomou [et al.] // Engineering Structures. – 1921. – Vol. 56. – P. 1905–1921.
14. Crisafulli, F.J. Seismic behaviour of reinforced concrete structures with masonry infills: дис. … PhD: неопубл. отчёт / F.J. Crisafulli; University of Canterbury. – Christchurch. – 1997.
15. El-Kholy, A.M. Modeling of masonry infilled RC frames with different aspect ratios using plastic hinge and equivalent strut / A.M. El-Kholy, S.M. Sayed, M.M. El-Assaly, M.K. Ismail // Journal of Engineering and Applied Science. – 2025. – Vol. 72. – DOI: 10.1186/s44147-024-00556-x.
16. Murty, C.V. R. Beneficial influence of masonry infill walls on seismic performance of RC frame buildings / C.V. R. Murty, S.K. Jain // Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering. – 2000. – No. 1790.
17. Brodsky, A. Behavior of masonry infill walls in case of failure of a supporting column / A. Brodsky, O. Rabinovitch, D.Z. Yankelevsky // Proceedings of the 13th Canadian Masonry Symposium. – 2017. – No. 184.
18. Bamani, B. Impact of vertical and horizontal sliding joints on the behavior of RC infilled frames after column failure / B. Bamani, A. Brodsky // Engineering Failure Analysis. – 2025. – Vol. 171. – Art. 109309.
19. Mondal, G. Lateral stiffness of masonry infilled reinforced concrete (RC) frames with central opening / G. Mondal, S.K. Jain // Earthquake Spectra. – 2008. – Vol. 24, No. 3. – P. 701–723.

20. Kakaletsis, D.J. Experimental investigation of infilled reinforced concrete frames with openings / D.J. Kakaletsis, C.G. Karayannis // ACI Structural Journal. – 2009. – Vol. 106, No. 2. – P. 132–141.
21. Todorovic, L. Effect of openings on the seismic response of AAC infilled frames and an innovative method to improve performance / L. Todorovic, I.O. Demirel, B. Binici // International Journal of Masonry Research and Innovation. – 2020. – Vol. 5, No. 2. – P. 226–247. – DOI: 10.1504/IJMRI.2020.106333.

AGRICULTURAL ENGINEERING AND AGRO-INDUSTRIAL TECHNOLOGIES

Received: 30.10.2026
Accepted: 05.11.2026
Published: 28.11.2026

УДК 631.674.5+635.132

DOI: 10.32743/UniTech.2026.152.11.23668

Impact of sprinkler irrigation intensity on carrot yield and water productivity in Uzbekistan

Burkhonova Munisakhon
PhD, Researcher
"TIIAME" National Research University
Uzbekistan, Tashkent
ORCID: 0009-0007-0745-3669
E-mail: munisaburxonova1998@gmail.com
Matyakubov Bakhtiyar
doctor of Agricultural Sciences (DSc)
professor "TIIAME" National Research University
Uzbekistan, Tashkent
ORCID: 0000-0002-1952-4475
E-mail: bmatyakubov@inbox.ru
Kasimbetova Saltanat
candidate of Technical Sciences, Associate Professor
"TIIAME" National Research University
Uzbekistan, Tashkent
ORCID: 0000-0003-3614-0147
E-mail: k.saltanatabdullaevna@gmail.com
Nazaraliyev Dilshod
candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor
Uzbekistan
"TIIAME" National Research University; Uzbekistan
Tashkent
ORCID: 0009-0002-4333-5612
E-mail: dilshod1963nazaraliyev@gmail.com

Библиографическое описание: Влияние интенсивности дождевания на урожайность моркови и продуктивность оросительной воды в Узбекистане // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Бурхонова М. [и др.]. 2026. 11(152). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23668

For citation: Impact of sprinkler irrigation intensity on carrot yield and water productivity in Uzbekistan // Universum: Technical Sciences : electronic scientific journal. Burkhonova M. et al. 2026. No. 11(152). Available at: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23668

Влияние интенсивности дождевания на урожайность моркови и продуктивность оросительной воды в Узбекистане

Бурхонова Мунисахон
докторант (PhD)
кафедра «Ирригация и мелиорация», Национальный исследовательский университет «ТИИИМСХ»
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Матякубов Бахтияр
д-р с.-х. наук, проф.
кафедра «Ирригация и мелиорация», Национальный исследовательский университет «ТИИИМСХ»
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Касымбетова Салтанат
канд. техн. наук, доц.
Национальный исследовательский университет «ТИИИМСХ»
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Назаралиев Дилшод
канд. с.-х. наук, доц.
Национальный исследовательский университет «ТИИИМСХ»
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Abstract

This study investigated the influence of sprinkler irrigation intensity on carrot yield and irrigation water productivity under the typical grey soil conditions of the Tashkent region, Uzbekistan. Field experiments conducted from 2023 to 2025 used the ‘Mirzoyi Kizil’ carrot variety and compared four treatments in three replications: conventional furrow irrigation and sprinkler irrigation at application intensities of 0.3, 0.4, and 0.5 mm/min. Pre-irrigation soil moisture was managed at 80–75–60 % of field capacity. Sprinkler irrigation at 0.4 mm/min produced the most favorable outcomes, reducing average seasonal irrigation water use from 5798 to 3897 m³/ha, equivalent to a 32.8 % saving. Average carrot yield increased from 22.63 to 29.20 t/ha, while irrigation water productivity rose from 3.91 to 7.50 t/1000 m³. Raising application intensity to 0.5 mm/min did not provide additional benefits. These results support adopting moderate sprinkler intensity to effectively conserve irrigation water while maintaining high carrot productivity in the study area.

Аннотация

В исследовании оценено влияние интенсивности дождевания на урожайность моркови и продуктивность оросительной воды в условиях типичных серозёмов Ташкентской области Узбекистана. Полевые опыты проводились в 2023–2025 годах с использованием сорта моркови «Мирзои Кизил». В трёхкратной повторности сравнивали четыре варианта: традиционный полив по бороздам (контроль) и дождевание с интенсивностью 0,3; 0,4 и 0,5 мм/мин. Предполивную влажность почвы поддерживали на уровне 80–75–60 % от наименьшей влагоёмкости. Наиболее эффективным оказался вариант с интенсивностью дождевания 0,4 мм/мин: средняя сезонная оросительная норма снизилась с 5798 до 3897 м³/га, что обеспечило экономию воды на 32,8 %. Средняя урожайность моркови повысилась с 22,63 до 29,20 т/га, а продуктивность оросительной воды — с 3,91 до 7,50 т/1000 м³.

Увеличение интенсивности до 0,5 мм/мин не дало дополнительных преимуществ. Полученные результаты подтверждают целесообразность применения дождевания с интенсивностью 0,4 мм/мин для рационального использования поливной воды и повышения урожайности моркови в исследуемых условиях, что особенно важно для орошаемого земледелия в засушливом климате региона.

Keywords: sprinkler irrigation, carrot yield, application intensity, irrigation water productivity, water saving, typical grey soils.

Ключевые слова: дождевание, урожайность моркови, интенсивность дождевания, продуктивность оросительной воды, экономия воды, типичные серозёмы.

Funding: This study received no external funding.

Финансирование: исследование выполнено без внешнего финансирования.

Conflict of interest: The author(s) declare no conflict of interest.

Конфликт интересов: автор(ы) заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Acknowledgements: Artificial intelligence (AI) was used solely to assist in translating the abstract into Russian. The authors reviewed and verified the translation and take full responsibility for its content.

Благодарности: Искусственный интеллект (ИИ) использовался исключительно для перевода аннотации на русский язык. Авторы проверили перевод и несут полную ответственность за его содержание.

Introduction

Increasing freshwater scarcity highlights the need for efficient irrigation management, particularly in water-stressed agricultural regions [1,2]. Carrot (Daucus carota L.) production is sensitive to rainfall deficits and soil moisture fluctuations, which can affect crop growth and yield [3,4]. Sprinkler irrigation enables controlled water application, although its effectiveness depends on operating pressure, application intensity, and distribution uniformity [5,6]. Previous studies in Uzbekistan have demonstrated its potential to reduce water consumption and improve vegetable productivity [7].

Irrigation regimes significantly influence carrot yield, root quality, and water use efficiency [8–10]. Recent studies emphasize soil moisture-based scheduling and optimized irrigation practices to improve crop productivity [11]. However, limited research has examined sprinkler application intensities under the typical grey soil conditions of Central Asia. Therefore, this study evaluated the effects of sprinkler intensities of 0.3, 0.4, and 0.5 mm/min on seasonal irrigation water use, carrot yield, and irrigation water productivity in the Tashkent region during 2023–2025, compared with conventional furrow irrigation.

Materials and methods

2.1. Study Area. The field experiments were conducted at the experimental farm of TIIAME National Research University, located in Yukori Chirchik District, Tashkent Region, Uzbekistan, approximately 40–50 km northeast of Tashkent city. The study area lies on a foothill plain near the upper reaches of the Chirchik River and is characterized by extensive irrigated agricultural land (Fig. 1).

Figure 1. Location of the experimental site at the "TIIAME" National Research University experimental farm

2.2. Climatic, Topographical and Soil Conditions. The experimental site is situated at 356 m above sea level in the Tashkent region, characterized by a semi-arid continental climate with hot, dry summers and precipitation mainly from January to May. During 2023–2025, monthly air temperatures ranged from −3.2 to 31.0 °C, relative humidity from 34.8 % to 90.2 %, and May–August wind speeds from 1.15 to 1.74 m/s. The terrain is nearly flat, with a northwestward slope of 0.002–0.005. Soils are predominantly non-saline, medium-loamy typical serozems, containing 1.0–1.5 % humus, with a pH of 6.9–7.1. Limited summer rainfall emphasizes the need for efficient irrigation management.

2.3. Experimental Design and Irrigation Treatments. Field experiments followed a randomized design with four treatments and three replications. Sprinkler plots used S-10 Mini sprinklers with a 6.0 m wetted radius. Each coverage area contained 14 carrot rows spaced 0.70 m apart, including 6 measurement and 8 guard rows. With sprinklers arranged in two rows, each plot measured 19.6 × 20 m (392 m²), covering a total experimental area of 4704 m² (Fig. 2). Treatments included conventional furrow irrigation (control) and sprinkler irrigation at intensities of 0.3, 0.4, and 0.5 mm/min, maintaining pre-irrigation soil moisture thresholds of 80–75–60 % of field capacity.

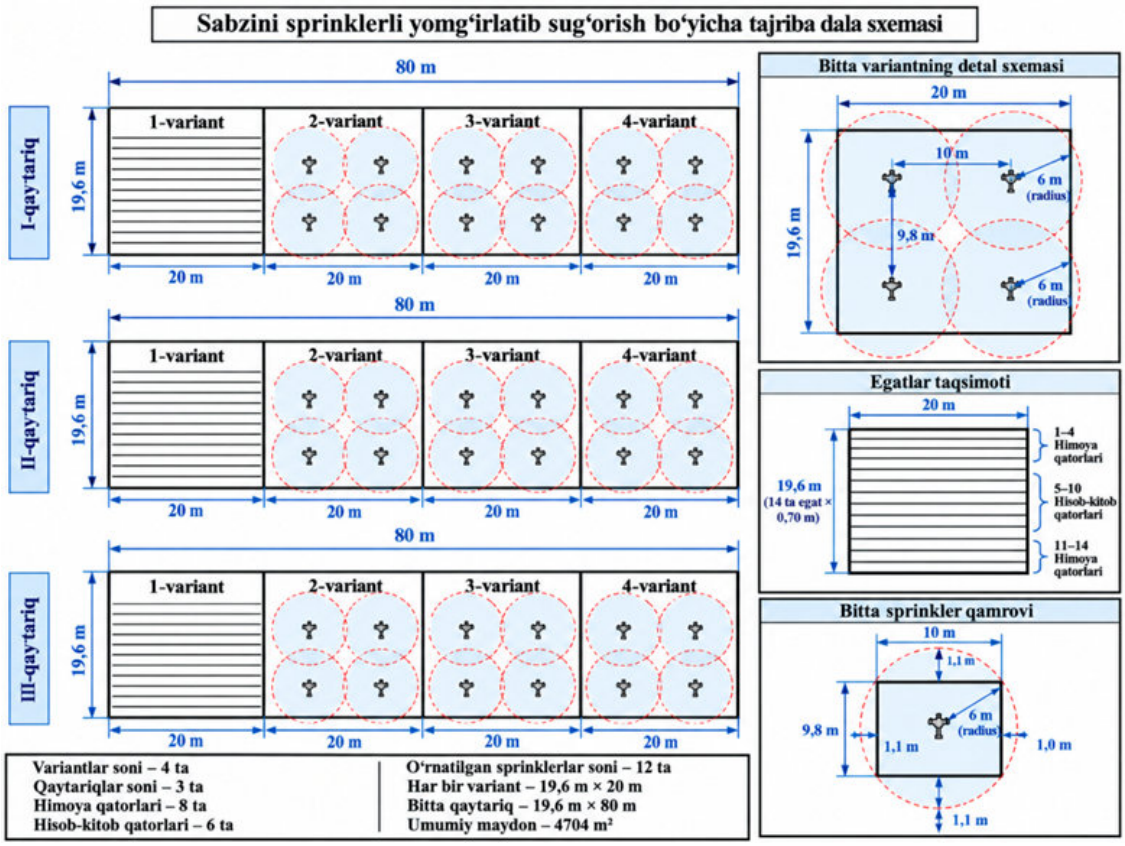


Figure 2. Layout of the experimental field

Results and discussion

3.1. Seasonal Irrigation Water Use and Irrigation Water Productivity. The field experiments conducted during 2023–2025 revealed considerable differences in seasonal irrigation water use and irrigation water productivity among the four treatments. Sprinkler irrigation consistently required less water than conventional furrow irrigation while achieving higher irrigation water productivity. The results for the three growing seasons are presented in Table 1.

Table 1. Seasonal Irrigation Water Use and Irrigation Water Productivity (2023–2025)

Treatment	Irrigation method	2023 Irrigation (m^3/ha)	2023 IWP (t/1000 m^3)	2024 Irrigation (m^3/ha)	2024 IWP (t/1000 m^3)	2025 Irrigation (m^3/ha)	2025 IWP (t/1000 m^3)
T1 (Control)	Furrow	5889	3.65	5713	4.15	5793	3.92
T2 (0.3 mm/min)	Sprinkler	4005	6.67	3995	6.98	3974	7.27
T3 (0.4 mm/min)	Sprinkler	3958	7.07	3910	7.52	3822	7.90
T4 (0.5 mm/min)	Sprinkler	4050	6.57	4020	6.84	3992	7.21

Note: IWP = Irrigation Water Productivity.

3.2. Effect of Sprinkler Application Intensity on Carrot Yield. Carrot yield was influenced by the irrigation method and sprinkler application intensity throughout the three-year experimental period (2023–2025). All sprinkler-irrigated treatments produced higher yields than conventional

furrow irrigation, although the magnitude of the improvement varied among treatments and growing seasons. The highest yield was consistently recorded under T3, with an application intensity of 0.4 mm/min (Table 2).

Table 2. Carrot yield under different irrigation treatments during 2023–2025

Treatment	Irrigation method	2023 (t/ha)	2024 (t/ha)	2025 (t/ha)	Three-year mean (t/ha)
T1 (Control)	Furrow irrigation	21.5	23.7	22.7	22.63
T2 (0.3 mm/min)	Sprinkler irrigation	26.7	27.9	28.9	27.83
T3 (0.4 mm/min)	Sprinkler irrigation	28.0	29.4	30.2	29.20
T4 (0.5 mm/min)	Sprinkler irrigation	26.6	27.5	28.8	27.63

Treatment T3 (0.4 mm/min) achieved the highest carrot yields of 28.0, 29.4, and 30.2 t/ha in 2023, 2024, and 2025, exceeding the control by 30.2 %, 24.1 %, and 33.0 %, respectively. The three-year average yield reached 29.20 t/ha, a 29.0 % increase over furrow irrigation (22.63 t/ha). Increasing application intensity to 0.5 mm/min provided no additional yield benefits. Thus, 0.4 mm/min combined with soil moisture thresholds of 80–75–60 % of field capacity was the most effective irrigation regime.

Conclusion

The 2023–2025 field study confirmed that sprinkler irrigation at 0.4 mm/min improved carrot yield and water productivity in the Tashkent region. Seasonal irrigation water use decreased from 5798 to 3897 m³/ha (32.8 %), while yield increased from 22.63 to 29.20 t/ha (29.0 %). Water productivity rose from 3.91 to 7.50 t/1000 m³ (92.0 %). Increasing intensity to 0.5 mm/min provided no additional benefits. Therefore, 0.4 mm/min with soil moisture thresholds of 80–75–60 % of field capacity is recommended for efficient carrot production on typical grey soils.

References

1. Mehta, P. Half of twenty-first century global irrigation expansion has been in water-stressed regions / P. Mehta, S. Siebert, M. Kummu [et al.] // Nature Water. – 2024. – Vol. 2. – P. 254–261. – DOI: 10.1038/s44221-024-00206-9.
2. Nazari, B. A New Perspective on Assessing the Real Water Savings Resulting from Irrigation Technology Interventions / B. Nazari, E. Kanani, S. Sepehri // Journal of Water Resources Planning and Management. – 2024. – Vol. 150, No. 9. – DOI: 10.1061/JWRMD5.WRENG-6479.
3. Rolbiecki, S. Climate-Induced Water Management Challenges for Cabbage and Carrot in Southern Poland / S. Rolbiecki, B. Jagosz, R. Rolbiecki [et al.] // Sustainability. – 2025. – Vol. 17, No. 15. – Art. 6975. – DOI: 10.3390/su17156975.
4. S. Rolbiecki, R. Ku. Forecasted Yield Responses of Carrot, Celeriac and Red Beet to Sprinkler Irrigation Under Climate Change in a Highly Water-Deficient Area of Central Poland // Water. – 2025. – Vol. 17, No. 22. – Art. 3239. – DOI: 10.3390/w17223239.

5. Zhu, X. Experimental study on the effects of pressure loss on uniformity, application rate and velocity on different working conditions using the dynamic fluidic sprinkler / X. Zhu, A. Fordjour, F.A. Dwomoh [et al.] // Heliyon. – 2024. – Vol. 10, No. 5. – DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e27140.
6. Ahmadi, S.H. Sprinkler Irrigation System Performance in Winter Wheat Fields: A Comprehensive Study / S.H. Ahmadi, S. Solgi, S. Mashouqi // Journal of Irrigation and Drainage Engineering. – 2024. – Vol. 150, No. 2. – DOI: 10.1061/JIDEDH.IRENG-10210.
7. Burkhonova, M. The Effectiveness of Sprinkler Irrigation for Vegetable Cultivation in Uzbekistan / M. Burkhonova, B. Matyakubov, N. Rakhmatov [et al.] // Proceedings of the 6th International Conference on Construction Mechanics, Hydraulics and Water Resources Engineering (CONMECHYDRO). – 2024. – P. 306–315. – DOI: 10.5220/0013562000004644.
8. Ciza, A. Carrot Productivity under Various Levels of Irrigation and Fertilization / A. Ciza, F.R. Silungwe, N.I. Kihupi // Asian Research Journal of Agriculture. – 2022. – Vol. 15, No. 4. – P. 56–68. – DOI: 10.9734/ARJA/2022/v15i430167.
9. Tlig, W. Carrot productivity and its physiological response to irrigation methods and regimes in arid regions / W. Tlig, F. El Mokh, D. Autovino [et al.] // Water Supply. – 2023. – Vol. 23, No. 12. – P. 5093–5105. – DOI: 10.2166/ws.2023.304.
10. Elshamly, A.M. S. Stimulating growth, root quality, and yield of carrots cultivated under full and limited irrigation levels by humic and potassium applications / A.M. S. Elshamly, S.M. A. Nassar // Scientific Reports. – 2023. – Vol. 13. – Art. 14260. – DOI: 10.1038/s41598-023-41488-5.
11. Ashine, E.T. Response of Carrot (Daucus carota L.) to Supplementary Irrigation under Rain-Fed Agriculture at Jimma and Gera, Jimma Zone, South West Ethiopia / E.T. Ashine, M.T. Bedane, A.A. Mengesha // Advances in Agriculture. – 2024. – Vol. 2024. – Art. 3976619. – P. 1–14. – DOI: 10.1155/2024/3976619.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК

UNIVERSUM: ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Электронный научный журнал

№ 11(152)
Ноябрь 2026 г.

Свидетельство о регистрации СМИ: ЭЛ № ФС 77 – 54434 от 17.06.2013

Мнение авторов может не совпадать с позицией редакции.

18+

Издательство ООО «Юниверсум»

Объём издания: 1060 с.

Минимальные системные требования: процессор с частотой от 1,3 ГГц; ОЗУ от 512 МБ; программа для чтения PDF-файлов; доступ к сети Интернет

Дата размещения в сети Интернет: 28.11.2026

Журнал размещается в:

CYBERLENINKA

Google scholar

BASE

OpenAIRE

НАУЧНАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ БИБЛИОТЕКА eLIBRARY.RU

ULRICHSWEB GLOBAL SERIALS DIRECTORY

СОЦИОНЕТ

EBSCO

Registry of Open Access Repositories (ROAR)