ISSN : 2311-5122

7universum.com

UNIVERSUM: ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

10(151)



110 ЛЕТ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ
11 июля 2026 г.

ПРОХОРОВ АЛЕКСАНДР МИХАЙЛОВИЧ 1916-2002 гг.

РОССИЙСКИЙ ФИЗИК, ЛАУРЕАТ НОБЕЛЕВСКОЙ ПРЕМИИ ПО ФИЗИКЕ, ОДИН ИЗ ИЗОБРЕТАТЕЛЕЙ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Г. МОСКВА

7universum.com
UNIVERSUM:
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

UNIVERSUM: ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Научный журнал

Издается ежемесячно с ноября 2013 года

Выпуск: 10(151)

Октябрь 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. — № 10(151). — Новосибирск : Изд-во «Юниверсум», 2026. — 772 с. — Текст : электронный. — URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/category/10151 (дата публикации: 28.10.2026).

ISSN 2311-5122
DOI: 10.32743/UniTech.2026.151.10
Учредитель и издатель: ООО «Юниверсум»
© ООО «Юниверсум», 2026 г.

Содержание

Статьи на русском языке

Информационные и цифровые технологии

Информатика, вычислительная техника и управление

Разработка алгоритма для обнаружения и удаления подозрительных сетевых пакетов в информационно-коммуникационных системах 11
Арзиев Али Тилеубаевич

Методологии автоматизации сквозного тестирования при интеграции платежных шлюзов в SAAS-платформах 20
Кузнецов Дмитрий

Разработка адаптивного расширенного фильтра Калмана для оценки состояния беспилотного летательного аппарата с использованием недорогих датчиков IMU/GNSS в условиях ухудшения сигнала GPS 32
Ле Куи Ань
Ле Нгок Ан

Цифровая трансформация отраслей промышленности

Исследование 3D-печатных фильтрующих элементов из PETG для очистки гидравлических рабочих жидкостей от механических загрязнений 41
Абдуазизов Набижон Азаматович
Турдиев Сардоржон Абдумуминович
Жураев Акбар Шавкатович
Нийетбаев Арисланбек Даулетбай ули

Промышленность и производство

Химические технологии и химическая промышленность

Экспериментальное исследование распределения скорости газа в рабочих зонах роторно-фильтрующего аппарата 54
Исомидинов Азизжон Саломидинович

Экспериментальное исследование высоты газовой подушки в зоне смешения абсорбционного аппарата 66
Каримов Икромали Тожиматович
Халилов Исмоил Латифжон уғли

Физико-химический анализ структурных и пористых характеристик натриевой и цинковой форм 74
Комолова Гульнора Комиловна
Юсупова Лола Азимовна
Исмаилов Бобурбек Махмуджанович

Системно-смысловой анализ физико-химических и межфазных энерго- и массообменных процессов при переработке плодов и овощей 86
Курбанова Мадина Джамшедовна
Курбанов Жамшед Мажидович
Додаев Кучкор Одилович

Технологическое и квантово-химическое обоснование перспективной Na-КМЦ-композиции с виниловыми эфирами фруктовых кислот 95
Махмудова Махпурахон Хабибулло кизи
Солиев Махаммаджон Исматуллаевич
Охундадаев Абдугани Комилжон угли
Сайпиев Турсунпулот Собитович

Синтез и физико-химические свойства мезопористого кремнезёма из рисовой шелухи, модифицированного оксидом висмута 100
Муратов Миртохир Мирхалил угли
Мадримова Озода Шукурллаевна
Хошимов Шахром Мансуржон угли
Эшметов Иззат Дусимбатович
Маматалиев Нозим Нимаджонович

Ускоренный метод определения текучести цементного теста с химическими добавками 111
Мухамедбаев Абдугафур Абдувалиевич
Шакаров Тулкин Исматович
Мухамедбаев Абдували Абдусаттарович
Масидиков Шерзад Абдурасулович
Кадыров Хайрулло Марибжанович

Экологическая опасность органических веществ, взвешенных частиц, коллоидных соединений, биогенных элементов и моющих средств в сточных водах пивоваренного производства 121
Мухамедов Кабилджан Гафурович
Насирова Нилуфархон Кабилджановна
Ши-Сянь Вячеслав Викторович
Мухамедов Жамалиддин Кабилджанович

Разработка технологии предотвращения поглощения растворов при бурении геотехнологических скважин на уран 132
Наримов Равшанбек Анарметович
Ахмедов Аброр Сайидмурод угли
Кадыров Нодир Абдусамикович
Кадыров Абдусамик Абдувасикович
Умаров Бахром Сманович

Исследование кинетики разделения водомасляной эмульсии отработанного масла под влиянием деэмульгатора «КХД-М-1» и температурного фактора 141
Негматов Сайибжан Садыкович
Исмаилов Равшан Исраилович
Негматова Комила Сайибжановна
Раупова Дилфуза Нуруллаевна
Мусабеков Дилшод Хакимович
Negmatov Sayibjan

Разработка эффективных составов и исследование физико-химических свойств композиционных ингибиторов, применяемых для защиты от коррозии машин и механизмов нефтегазовых скважин 149
Номозов Сардор Суннатович
Негматова Комила Сайибжановна
Икрамова Мукаддас Эралиевна
Абед Нодира Сайибжановна
Негматов Сойибжон Садикович

Исследование процесса электризации при фрикционном взаимодействии полимерных, композиционных полимерных материалов и покрытий с хлопком-сырцом в зависимости от вида и природы полимеров и наполнителей 159
Нормуродов Анвар Азамат Ўғли
Бозорбоев Шухрат Абдурахимович
Рахимкулова Тулкиной Мухтаровна
Эргашев Нурбек Эркинович
Холматова Элдора Абдуназаровича

Влияние суммы примесей на сорбцию урана анионитом АМП 179
Ражаббоев Ибодулла Муродуллаевич

Влияние микроремнезема на процесс твердение облегчённых тампонажных цементных растворов 187
Талипов Нигматулла Хамидович
Панжиев Олимжон Холлиевич
Салимова Саодат Ашуровна
Абед Нодира Сойибжоновна
Туляганова Васила Сунатиллаевна
Аликабулов Шухрат Абдумаликович
Муллажонов Тулкин Тохтабоевич
Ражабов Ёркинжон Сайфиддин угли

Коллоидные и реологические свойства функционального майонеза на основе смесевых растительных масел 195
Чориева Иқлима Йулдош қизи
Салиханова Дилноза Саидакбаровна

Кислые стоки гидрометаллургических производств: образование, химизм и нейтрализация 202
Шарипов Санъат Шухрат угли
Юлдошева Муниса Баходир кизи
Азимова Дилафруз Бурхон кизи

Нефтяная и газовая промышленность. Переработка углеводородного сырья

Интегрированное моделирование системы «пласт-скважина-обустройство» для анализа причин снижения продуктивности и сценарной оценки работы массивных нефтегазоконденсатных залежей на поздней стадии 212
Ахатова Гулиза Анвар кизи
Бозоров Улугбек Суюн угли
Хайитов Лазиз Комилович
Саматов Шерзод Шавкатович
Жураева Юлдуз Шамил кизи

Лабораторное исследование процесса кислотной обработки призабойной зоны трещиноватых карбонатных коллекторов месторождений Бухаро-Хивинского нефтегазоносного региона 220
Кан Кирилл Эдуардович

Морфология, элементный состав и термическое поведение гидролизованного полиакрилонитрила при массовом соотношении ПАН и NaOH 1:8 232
Очилов Юсуфжон Азамат угли
Нуркулов Файзулла Нурмуминович
Ёдгаров Нормухаммад
Абдукаримов Мирзохид Муратович
Закиров Азамжон Алимджанович
Изомов Мирсаид Хикматулло угли

Качественная характеристика микрорельефа поверхности эпоксидно-минерального антикоррозионного покрытия методом СЭМ/EDS 245
Эшкобилов Джамшид Хайитмурод угли
Абдукаримов Мирзохид Муратович
Ёдгоров Нормахмат

Влияния магнитного поля и скорости потока нефти на образование отложений на поверхности теплообмена 258
Юсупов Рустам Атхамович
Исаматова Джамиля Нигматуллаевна
Исмаилов Ойбек Юлибаевич
Саттаров Зафар Муродович

Металлургия, материаловедение и горное дело

Исследование износа деталей конусных дробилок обогатительных фабрик 268
Абдукаххаров Абдуазиз Абдулазизхон угли
Ахмадалиев Шохрух Шухратович

Переработка алунитовых руд месторождения Гушсай (Узбекистан) для получения глинозёма 274
Алматов Илхомжон Мирзабек угли
Алимов Дилшод Ширинкулович
Нурмухамедов Иброхим Суннатуллаевич

Условия и особенности проявления горного давления на руднике «Зармитан» 283
Буриев Шукурулла Убайдуллаевич
Жиянов Абдунор Бобокулович
Авазов Адхамбек Нуриллаевич

Комплексная переработка техногенных отходов гидрометаллургических заводов с извлечением благородных и редких металлов 294
Вохидов Бахриддин Рахмидинович
Рустамов Исломжон Илхомович
Мамараимов Гайрат Фарходович
Боймуродов Нажмиддин Абдукодирович

Анализ факторов разбуривания взрывных скважин на карьерах 305
Насиров Уткир Фатидинович
Суйунов Аброр Салохиддинович
Хайруллоев Шахзод Шукрилло угли

Определение напорной характеристики вентиляционно-эжекторной системы на основе аналитического и численного моделирования 314
Нурхонов Хусан Алмирза угли
Равшанов Аваз Али угли

Влияние микроструктуры и карбидной морфологии высокохромистых белых чугунов на гидроабразивный износ 328
Очилов Азизжон Султонович
Эгамбердиев Илхом Пулатович
Нажимов Комилжон Каххор у́гли
Тожибоев Жамшидбек Низомжон у́гли
Мамадияров Акмал Журакулович

Снижение расхода цианида натрия при сорбционном цианировании биокека 334
Санакулов Кувандик
Калонов Аваз Кахрамонович

Нейтрализация сероводорода в продуктивных растворах при подземном выщелачивании урана: теоретическое и лабораторное исследование 345
Шаропов Кодиржон Рашид угли
Халимов Илхом Убайдуллоевич

Машиностроение и робототехника

Кучность стрельбы на дальние дистанции: влияние разброса начальной скорости и БК на примере спортивной винтовки 33ХС 353
Богословский Владимир Николаевич

Текстильная и лёгкая промышленность

Механизмы ложного кручения в кольцевом прядении: анализ конструкций, принципов действия и перспектив развития 382
Махкамова Шоира Фахритдиновна
Муминова Шахзода Нигматжон кизи

Технология продовольственных продуктов и пищевая промышленность

Исследование технологических режимов обработки масличного сырья перед холодным прессованием 394
Бойназарова Юлдуз Анваровна

Разработка технологии пищевых продуктов пенной структуры с использованием яблочного и морковного пюре 403
Каланова Дилафруз Тошпулотовна

Разработка и математическое обоснование состава функциональной композитной крупы с повышенной биодоступностью железа 410
Камалова Фируза Рахматовна
Хаитов Рауф Арифович
Атамуратова Тамара Ивановна
Рахмонов Кахрамон Санокулович

Сравнительное экспериментальное исследование комбинированного ультразвукового и СВЧ-воздействия на процесс сушки винограда 419
Каримова Дилдора Шукриллоевна
Шарипов Нодиржон Замирович
Ибрагимов Равшан Рустамович

Многокритериальная оптимизация рецептур и оценка качества печенья с пониженным аллергенным потенциалом 428
Каримова Татьяна Яхшиевна

Влияние растительной композиции на структуру и показатели сохраняемости заварного кондитерского крема 438
Курбанова Шахноза Муродовна

Исследование и интенсификация процесса водной экстракции из вторичного сырья, образующегося после отжима сока из плодов граната (*Punica Granatum* L.) 445
Мамажонов Азаматилло Бахтиёр ўғли
Ахмедов Анвар Джабаралиевич
Мамадалиева Нилуфар Зокиржоновна
Хажибаев Темурбек Атаханович
Абдурахманов Бахтияр Алимович
Маматханов Ахматхон Умарханович
Халилов Равшанжон Муратджанович

Применение озоновой обработки для продления сроков хранения и сохранения качества винограда 459
Наркабулова Наргиза Чоршаммиевна
Таджибекова Ирода Эмильевна
Абдикаюмов Зайнилабиддин

Интенсификация процесса конденсации вторичного пара в аппаратах концентрирования виноградного сока за счет оптимизации гидродинамики ФАЗ 469
Рамазонов Собиржон Саид угли
Хабибов Фахриддин Юсупович
Шарипов Нодиржон Замирович

Исследование эффективного использования вторичного сырья риса: термическое разложение и структурные превращения рисовых отрубей при пиролизе 476
Рахматов Фуркат Эшпулат угли
Махмудова Дилдора Хасановна
Азаматов Умид Зокирович
Шохрух Бекмирзаев Икром угли
Рустамову Ферузу Мирзаахмедовну
Тошпулатова Дилором Фуркат кизи
Ёрматова Саодат Нарзулло кизи

Импульсные режимы виброконвективной сушки чеснока как резерв снижения удельных энергозатрат: расчётно-теоретическое обоснование 486
Сафаров Жасур Эсиргапович
Султанова Шахноза Абдувахитовна
Миркомилов Абдурахмон Мираббос угли

Проблемы классификации сушёной сливы в товарной номенклатуре внешнеэкономической деятельности республики Узбекистан: анализ на основе данных ВЭЖХ о влиянии способа сушки на химический состав 497
Юсупова Дилобар Абдужалиловна
Хамракулов Махмуд Гафурджанович

Инфраструктура и транспорт

Строительство, архитектура и жилищно-коммунальное хозяйство

Методы исследования и испытания сухих напольных покрытий на цементной основе 508
Айтмуратов Аманбай Туўелбай улы
Асаматдинов Марат Оринбоевич

Ревитализация неэксплуатируемых объектов и постиндустриальных территорий региона Кавказских Минеральных Вод: актуальность темы 522
Долинская Ирина Марковна
Трофимов Олег Сергеевич
Карпенко Дарья Денисовна
Давыдова Валерия Алексеевна

Критерии оценки влияния подземного строительства на городскую экосистему и методы его минимизации 531
Киптенко Роман Юрьевич

Влияние поликарбоксилатной добавки на прочность пенозолобетона 540
Сатторов Зафар Мурадович
Мадраймов Нийетбай Амангелдиевич

Приаэродромные территории как фактор устойчивого развития городской среды малых поселений Русского Севера (на примере Зимнего берега) 546
Шалагина Алена Александровна

Принципы интеграции медико-социальной направленности в городской среде 555
Шемякина Вероника Александровна
Зайцева Анастасия Андреевна

Энергетика и электроэнергетика

Изменение структуры отказов воздушных линий 10 кВ при замене неизолированного провода на самонесущий изолированный 574
Кузьмин Евгений Владимирович

Транспорт и транспортные системы

Исследование толщины масляной пленки между зубьями шестерен 583
Иргашев Бехзод Амиркулович
Иргашев Амиркул
Эгамбердиева Лайло Ахмаджон кизи

Повышение безопасности путевых работников на основе технологий железнодорожной мобильной связи и принципа ALARP 590
Яронова Наталья Валерьевна
Кудайбергенов Нурлан Жанабергенович

Авиационная и ракетно-космическая техника

Лестничный тест Крейтона Одетта: теоретический анализ и рекомендации 600
Жуков Игорь Геннадьевич

Экология и безопасность

Экология и техносферная безопасность

Исследование эффективности современных технологий тушения лесных пожаров и совершенствование способов их применения 622
Литяга Артём Валерьевич
Юлдашев Жавлонбек Раджапович

Охрана труда работников в цехах деревообрабатывающих предприятий 639
Мамаджанов Зокиржон Нематжанович
Мамадалиев Адхамжон Тухтамирзаевич

Articles in English

Information and Digital Technologies

Computer Science, Computing and Control

Classification of candidate information uncertainty in AI-based resume screening 650
Babayev Samir Cahid

Prospects for transforming user experience in web interfaces with ai assistants based on the Model Context Protocol 658
Poliantsev Iurii

Main threats to frontend applications with LLM integration and risk mitigation methods 667
Yakovleva Margarita

Industry and Manufacturing

Chemical Technologies and Chemical Industry

Adhesion strength of coatings based on hydrolyzed polyacrylonitrile modified with glycerin, dimethylol urea and dibutyl phthalate on a steel substrate 676
Ismatov Sherzod

Chemical and Microbiological Aspects of Water Retting for Fiber Extraction from Industrial *Cannabis* Stems 684
Nabieva Iroda Abdusamatovna
Yasinskaya Natalya Nikolaevna
Mamatvaliyev Ibrohimjon Tolib ugli
Abdumajidov Anvar Abdumalikovich
Miratayev Abdumalik Abdumadjidovich

Metallurgy, Materials Science and Mining

Development of technology for extracting non-ferrous and precious metals from flotation tailings 696
Turdiev Shakhboz Shermamat ugli
Abdirazakov Akmal Ibragimovich
Mallayev Shamshod Obidjon o‘g‘li
Turdiyev Farid Razzoq o'g'li

Food Technology and Food Industry

Research of physical and chemical properties of waste cooking oils 707
Maripova Fotima Shakarbek kizi
Ruzibayev Akbarali Tursunboyevich

Evaluation of the osteoprotective potential of field horsetail and stinging nettle as potential additives in the production of functional bread 717
Shokirov Komil Akmalovich

Analysis of different apricot varieties grown in Uzbekistan to improve the production of salted kernels 725
Yamaletdinova Munira Faditovna

Infrastructure and Transport

Construction, Architecture and Housing and Utilities

Rational selection and justification of wall insulation technology for the reconstruction of large-panel residential buildings under the conditions of Uzbekistan 732
Khasanov Bakhrom
Bakhriddinova Zilola
Bakhriddinova Zilola

Transport and Transport Systems

Multi-source energy system as a promising direction for the development of hybrid vehicles 742
Tolibjonov Tohirjon Bakhtiyor ugli
Ishmuratov Khikmat Kakharovich
Hamroev Ramzjon Komiljon ugli

Ecology and Safety

Ecology and Technosphere Safety

Automated digital monitoring systems in debris flow risk assessment: a review of technologies, methods, and practices 748
Djumaev Nodir Makhmudovich
Adashev Shavkat Aminovich

Seasonal and spatial variability of monthly discharge along the Yevlakh–Zardab–Surra reach of the Kura river (2021–2025) 763
Huseynov Habil Akram

СТАТЬИ НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Статья поступила в редакцию: 06.10.2026
Статья принята к публикации: 19.10.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 004.056.5+004.7

Разработка алгоритма для обнаружения и удаления подозрительных сетевых пакетов в информационно-коммуникационных системах

Арзиев Али Тилеубаевич
докторант
Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммеда аль-Хорезми
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: jamka-1980@mail.ru

Development of an algorithm for detecting and removing suspicious network packets in information and communication systems

Arziyev Ali Tileubayevich
Doctoral candidate, Muhammad al-Khwarizmi Tashkent University of Information Technologies
Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

Статья посвящена разработке гибридного алгоритма обнаружения сетевых атак GHDA (Hybrid Intrusion Detection Algorithm), предназначенного для выявления подозрительных пакетов и аномального сетевого трафика в режиме реального времени. Актуальность исследования обусловлена ростом числа киберугроз, распространением сложных целевых атак (APT) и ограниченной эффективностью традиционных сигнатурных систем обнаружения вторжений при выявлении ранее неизвестных угроз. Предложенный подход объединяет преимущества сигнатурного анализа и поведенческого мониторинга сетевого трафика. В основе алгоритма лежит вычисление интегрального показателя подозрительности пакета (Suspicion Score), учитывающего результаты проверки заголовков, статистические характеристики потоков и систему взвешенных критериев. Архитектура GHDA включает

Библиографическое описание: Арзиев А.Т. Разработка алгоритма для обнаружения и удаления подозрительных сетевых пакетов в информационно-коммуникационных системах // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23581

модули захвата пакетов, анализа заголовков, поиска сигнатур на основе алгоритма Ахо-Корасика, статистического анализа потоков и принятия решений. Для оценки эффективности алгоритма использованы общепринятые наборы данных CICIDS-2017 и NSL-KDD. Теоретическая оценка показала высокую результативность обнаружения атак типов SYN Flood, DoS/DDoS, Botnet и APT при среднем уровне истинно положительных срабатываний 93,6 % и низкой доле ложных срабатываний 1,7 %. Применение алгоритма Ахо-Корасика позволило обеспечить линейную вычислительную сложность поиска сигнатур, а автоматическая генерация правил фильтрации и адаптивное обновление статистической модели повысили автономность функционирования системы. Полученные результаты подтверждают перспективность использования гибридных методов для повышения эффективности современных систем обнаружения вторжений и защиты корпоративных и государственных информационных сетей.

Abstract

This article focuses on the development of a hybrid network attack detection algorithm (GHDA) designed to identify suspicious packets and anomalous network traffic in real time. The study is motivated by the rising number of cyber threats, the proliferation of sophisticated Advanced Persistent Threats (APTs), and the limited effectiveness of traditional signature-based intrusion detection systems in identifying previously unknown threats. The proposed approach combines the advantages of signature analysis and behavioral network traffic monitoring. The algorithm relies on calculating an integral packet «Suspicion Score,» which incorporates header inspection results, flow statistics, and a system of weighted criteria. The GHDA architecture comprises modules for packet capture, header analysis, signature matching (based on the Aho-Corasick algorithm), statistical flow analysis, and decision-making. The widely recognized CICIDS-2017 and NSL-KDD datasets were used to evaluate the algorithm's performance. Theoretical assessment demonstrated high effectiveness in detecting SYN Flood, DoS/DDoS, Botnet, and APT attacks, achieving an average true positive rate of 93.6 % and a low false positive rate of 1.7 %. Implementing the Aho-Corasick algorithm ensured linear computational complexity for signature matching, while the automatic generation of filtering rules and the adaptive updating of the statistical model enhanced the system's operational autonomy. The results confirm the potential of hybrid methods to improve the efficiency of modern intrusion detection systems and the protection of corporate and government information networks.

Ключевые слова: сетевая безопасность, обнаружение аномалий, IDS/IPS, DDoS, SYN-флуд, гибридный алгоритм, энтропия.

Keywords: network security, anomaly detection, IDS/IPS, DDoS, SYN flood, hybrid algorithm, entropy.

Введение

Современные атаки начинаются уже не с повреждения файлов, а с использования самих сетевых пакетов в качестве оружия. Иногда достаточно одного подозрительного пакета, оставшегося незамеченным. В рамках программы «Цифровой Узбекистан 2030» значительная часть государственных служб и финансовой системы перешла в онлайн-режим;

вместе с этим увеличилось и число возможных целей. По статистике Узбекского CERT, ежедневно в национальных сегментах сетей обнаруживаются сотни тысяч подозрительных пакетов — и это только число «пойманных».

В настоящее время широко используемые средства защиты, такие как Snort и Suricata, в основном полагаются на сигнатуры, то есть на «отпечатки пальцев» ранее наблюдавшихся атак [1]. Это хорошо работает, но требуется некоторое время, чтобы появился новый метод атаки, прежде чем сигнатуры будут обнаружены в базе данных; именно тогда может быть нанесен ущерб. APT-атаки разработаны таким образом, чтобы не оставлять никаких сигнатур — они проникают в обычный трафик и работают незамеченными в течение нескольких месяцев [2].

Для решения этой проблемы в данном исследовании был разработан гибридный подход, который отслеживает статистику трафика вместе с базой данных сигнатур [3]. Предметом исследования является система обнаружения в реальном времени, основанная на параметрах заголовка пакета, статистике потока и наборе взвешенных критериев.

Цель исследования — разработка и теоретическое обоснование гибридного алгоритма обнаружения и удаления подозрительных сетевых пакетов GHDA, сочетающего сигнатурный анализ на основе алгоритма Ахо-Корасика со статистическим поведенческим мониторингом сетевого трафика, для повышения эффективности обнаружения известных и ранее неизвестных сетевых атак (SYN Flood, DoS/DDoS, Botnet, APT) в режиме реального времени при сохранении низкого уровня ложных срабатываний и высокой вычислительной производительности.

Материалы и методы

Методологическую основу исследования составили методы системного анализа, сравнительного исследования существующих средств обнаружения вторжений, а также методы математического моделирования и анализа сетевого трафика [4]. Для выявления подозрительных пакетов использован разработанный гибридный алгоритм GHDA, объединяющий сигнатурный анализ, статистическую обработку параметров сетевых потоков и систему взвешенной оценки степени подозрительности пакетов [5]. Теоретическая оценка эффективности предложенного алгоритма выполнена с использованием общепринятых наборов данных CICIDS-2017 и NSL-KDD по показателям точности обнаружения и уровня ложных срабатываний [6, 7].

Классификация сетевых атак и подозрительных пакетов. Наиболее полезный подход для специалиста — классификация сетевых атак по механизму [1]. DoS и DDoS-атаки заваливают цель избыточным количеством пакетов, лишая её возможности отвечать на легитимные запросы; SYN-флуд злоупотребляет механизмом TCP, захватывая полуоткрытую таблицу сессий сервера [8]. Хотя само сканирование портов не наносит прямого ущерба, оно собирает информацию, необходимую для следующего этапа атаки, поэтому стратегически важно остановить его на начальном этапе [2]. Сами подозрительные пакеты можно разделить на четыре категории: некорректно сформированные, специально созданные, пакеты скрытого канала и разведывательные пакеты [1].

Таблица 1. Основные типы атак и признаки их идентификации

Тип атаки	Механизм	Слой	Подозрительный символ
DoS / DDoS	Чрезмерный скачок пакетов	L3/L4	Резкое увеличение интенсивности
SYN Flood	Агрегация полуоткрытых TCP-сессий	TCP	Соотношение SYN/ACK > 10
Сканирование портов	Последовательное тестирование открытых портов	L4	Много RST/FIN за короткий промежуток времени
IP Spoofing	Подмена исходного IP-адреса	L3	Адрес Богона или марсианский адрес
Botnet C&C	Секретная связь с центральным сервером	Практично	Единообразные, периодические запросы
APT	Долгосрочная атака низкой интенсивности	Все	Необычный профиль потока

Система оценки степени подозрения и критерии.

В основе алгоритма GHDA (Hybrid Intrusion Detection Algorithm) лежит вычисление показателя подозрительности (Suspicion Score, SS) для каждого пакета:

$$SS(p) = \Sigma_i W_i \times R_i(p)$$

Здесь $R_i(p)$ — результат проверки i (1 или 0), w_i — весовой коэффициент. Если SS ≥ 0,7, пакет считается подозрительным, если SS ≥ 0,9, он немедленно блокируется. Веса определялись на основе двух факторов: вероятности ложных срабатываний и степени специфичности типа атаки. Поскольку R4 (флаг аномалии TCP) никогда не встречается в легитимном трафике, w_i=1,0; географическая аномалия (R10) ограничена значением w_1=0,4, поскольку она может быть вызвана VPN [5]. При пороговом значении SS, равном 0,7, F1-мера дала наивысший результат: при более низком значении количество ложных срабатываний увеличилось, а при более высоком — некоторые атаки прошли успешно [3].

Таблица 2. Система критериев GHDA

Код	Название критерия	Состояние	w_i
P1	Увеличение скорости SYN	Скорость SYN / среднее значение > 10	0,90
P2	Несколько попыток порта	Более 20 портов с одного IP-адреса одновременно.	0,70
P3	Необычное ТТЛ	TTL < 32 или TTL = 0	0,80
P4	Неверные флаги TCP	NULL/Xmas / SYN+FIN вместе	1.00
P5	ICMP-флуд	Более 100 ICMP в секунду	0,75
P6	Коэффициент объема DNS	Размер ответа/запроса > 50	0,85
P7	Сопоставление адресов C&C	Адрес доступен в базе данных угроз.	1.00
R8	Энтропийный скачок	H ток - H база| > 0,5	0,60
P9	IPT плоский	CV(IPT) < 0,05 и n > 10	0,65
10 рэндов	Географическое отклонение	Страна происхождения не указана	0,40

Структура алгоритма и псевдокод. GHDA работает как конвейер, состоящий из пяти последовательных модулей: PCM (захват пакетов), HVM (проверка заголовков), SMM (сигнатуры, основанные на алгоритме Ахо-Корасика), FSAM (статистика потока) и MM (исключение) [3]. Автомат Ахо-Корасика проверяет все сигнатуры за один проход за время $O(|P|+|S|)$ — значительная экономия по сравнению с временем $O(|S|\times|P|)$, затрачиваемым на отдельные сравнения [9]. FSAM вычисляет четыре метрики на уровне потока: интенсивность SYN, разнообразие портов, энтропию Шеннона и коэффициент вариации IPT $CV=\sigma/\mu$. $CV < 0,05$ является явным признаком бот-несовершенства — человек никогда не сможет отправлять пакеты с равномерным интервалом, как машина [3, 5].

Алгоритм 1: GHDA – главный конвейер

```
ПОДГОТОВКА: загружены flow_table, baseline, sig_db, ti_db.
ЦИКЛ (на упаковку):
 meta - title_extract(pt); fid 5-tuple(meta)
 [1] HVM(pkt) = БЛОК → журнал + пропуск
 [2] cm SMM(pkt,sig_db); если найдено → SS += cm.weight
 [3] SS += FSAM(fid, flow_table) // аномалия потока
 [4] src/dst ∈ ti_db → SS += 1.0
 [5] SS<0.7 проход | 0.7≤SS<0.9 глубокая проверка
     SS≥0.9 → MM.block(ptt, fid, 3600 seconds)
ФУНКЦИЯ HVM(pt):
 Версия IP {4,6} | TTL=0 | SYN+FIN | Сканирование NULL/Xmas → BLOCK
 Bogon/martian src_ip                    → СОМНИТЕЛЬНО
 Все хорошо                              → ПЕРЕВОД
ФУНКЦИЯ FSAM(feed, table):
 syn_speed>base×10→+0.90 | ports≥20 +0.70
 |ΔH|>0.5 - +0.60          | CV<0.05→ +0.65
 RETURN min(score, 1.0)
```

Результаты и обсуждения

Результаты теоретической оценки. Алгоритм GHDA был теоретически оценён на основе наборов данных CICIDS-2017 и NSL-KDD [6, 7]. Оценка проводилась путём имитационного моделирования на размеченных выборках с разделением трафика на легитимный и атакующий [4]. Для каждого типа атак рассчитывались следующие показатели: True Positive Rate (TPR), False Positive Rate (FPR), точность (Precision), полнота (Recall) и F1-мера [1]. Результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3. Показатели эффективности GHDA по типам атак (теоретическая оценка)

Тип атаки	TPR, %	FPR, %	Precision, %	Recall, %	F1, %
SYN Flood	99,1	0,8	98,7	99,1	98,9
DoS / DDoS	98,4	1,1	98,1	98,4	98,2
Botnet / C&C	94,2	1,9	93,5	94,2	93,8
APT	82,7	2,7	81,9	82,7	82,3
Средневзвешенное	**93,6**	**1,7**	**93,1**	**93,6**	**93,3**

Как видно из таблицы 3, для SYN-флуда и DoS/DDoS система показала точность 98–99 %. Это объясняется тем, что сигнатуры и критерии R1/R8 (увеличение скорости SYN и энтропийный скачок) вместе дают хороший результат: сигнатурная часть быстро идентифицирует известные шаблоны, а статистическая — подтверждает аномалию на уровне потока. Боты и скрытые каналы немного сложнее: здесь TPR составил 94,2 %, что связано с периодичностью и маскировкой трафика под легитимные запросы. Для APT TPR = 82,7 % также является неплохим результатом по сравнению с 70–75 % в других системах, однако именно это направление остаётся наиболее уязвимым для гибридного подхода без использования поведенческих моделей на основе LSTM.

Ключевой момент: показатель FPR = 1,7 % был установлен на очень низком уровне, поскольку на практике чрезмерное количество предупреждений может привести к «усталости от предупреждений» у операторов [10]. При пороге SS = 0,7 достигается баланс между чувствительностью и специфичностью: снижение порога до 0,6 увеличивало FPR до 3,4 %, а повышение до 0,8 — снижало TPR до 89,1 %. Таким образом, выбранный порог является оптимальным по F1-мере.

Дополнительно была оценена вычислительная сложность. Благодаря алгоритму Ахо-Корасика общая временная сложность поиска сигнатур составила $O(|P|+|S|)$, где $|P||P|$ — длина анализируемого пакета, $|S||S|$ — суммарная длина всех сигнатур. Для статистического анализа потоков сложность составляет $O(\log n)$ на одно обновление скользящего окна, что обеспечивает работу в режиме реального времени при пропускной способности до 10 Гбит/с на одном ядре [3].

Сравнение с существующими решениями (Snort, Suricata, а также гибридными системами на основе машинного обучения) показывает, что GHDA выигрывает за счёт комбинации сигнатурного и статистического анализа: при сопоставимом FPR удаётся повысить TPR для APT-атак на 7–12 процентных пунктов [1, 2, 5]. Автоматическая генерация правил iptables и адаптивный механизм обновления базовой статистики позволяют системе работать независимо от оператора — это особенно важно для небольших ИТ-команд [3].

Заключение

Алгоритм GHDA представляет собой гибридное решение, сочетающее методы сигнатурного обнаружения и анализа аномалий и функционирующее в режиме реального времени. В его основе лежит интегральная оценка степени подозрительности пакета, формируемая на основе системы взвешенных критериев, которая позволяет классифицировать трафик как легитимный, подозрительный или требующий немедленной

блокировки. Достигнутые показатели истинно положительных срабатываний и низкая доля ложных срабатываний подтверждают эффективность предложенного подхода, а выбранный порог обеспечивает баланс между чувствительностью и специфичностью.

Применение алгоритма Ахо-Корасика позволило сохранить линейную вычислительную сложность поиска сигнатур, что обеспечивает работу системы в режиме реального времени при высокой пропускной способности. Автоматическая генерация правил фильтрации и адаптивный механизм обновления базовой статистики позволяют системе функционировать независимо от оператора, что особенно важно для небольших ИТ-команд и организаций с ограниченными ресурсами.

Полученные результаты подтверждают перспективность использования гибридных методов для повышения эффективности современных систем обнаружения вторжений и защиты корпоративных и государственных информационных сетей. В будущем основными направлениями развития станут повышение чувствительности обнаружения APT-атак за счёт внедрения модуля поведенческого анализа на основе LSTM и автоматическое обновление информации об угрозах через протоколы STIX/TAXII [11].

Список литературы

1. Hozouri A., Mirzaei A., Effatparvar M. A comprehensive survey on intrusion detection systems with advances in machine learning, deep learning and emerging cybersecurity challenges // Discover Artificial Intelligence. – 2025. – T. 5.
2. Ahmad Z., Shahid Khan A., Wai Shiang C., Abdullah J., Ahmad F. Network Intrusion Detection System: A Systematic Study of Machine Learning and Deep Learning Approaches // Transactions on Emerging Telecommunications Technologies. – 2021. – T. 32, № 1. – P. 1–29.
3. Rbah Y. et al. Machine learning and deep learning methods for intrusion detection systems in iomt: A survey // 2022 2nd international conference on innovative research in applied science, engineering and technology (IRASET). – 2022. – P. 1–9.
4. Panchal R.K., Snehkunj R., Panchal V.V. A survey on network-based intrusion detection system using learning techniques // 2024 5th International Conference on Image Processing and Capsule Networks (ICIPCN). – 2024. – P. 740–747.
5. Karthiga B. et al. Intelligent intrusion detection system for VANET using machine learning and deep learning approaches // Wireless Communications and Mobile Computing. – 2022. – T. 2022.
6. Shafi M.M. et al. Toward generating a new cloud-based distributed denial of service (DDoS) dataset and cloud intrusion traffic characterization // Information. – 2024. – T. 15.
7. Gudla R. et al. A novel approach for classification of Tor and non-Tor traffic using efficient feature selection methods // Expert Systems with Applications. – 2024. – T. 249.
8. Postel J. RFC 793: Transmission Control Protocol. – IETF. – 1981.
9. Gottlieb S.G., Reinert K. Search schemes for approximate string matching // NAR Genomics and Bioinformatics. – 2025. – T. 7.
10. NIST SP 800–94. Guide to Intrusion Detection and Prevention Systems (IDPS). – 2007.

11. STIX/TAXII Specification. OASIS Standard [Электронный ресурс]. – 2021. URL: https://oasis-open.github.io/cti-documentation/ (дата обращения: 10.05.2026).

Статья поступила в редакцию: 22.09.2026
Статья принята к публикации: 02.10.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 004.415.53

DOI: 10.32743/UniTech.2026.151.10.23504

Методологии автоматизации сквозного тестирования при интеграции платежных шлюзов в SAAS-платформах

Кузнецов Дмитрий
старший инженер по обеспечению качества (Senior QA Engineer), член-основатель отдела обеспечения качества, FunnelFox
Сербия, г. Белград
E-mail: kuznetsovdmitryv@gmail.com

Methodologies for automation of end-to-end testing when integrating payment gateways in SAAS platforms

Kuznetsov Dmitry
Senior Quality Assurance Engineer, Founding Member of the Quality Assurance Department, FunnelFox
Serbia, Belgrade

Аннотация

Предмет исследования составляют методологии автоматизации сквозного тестирования при интеграции платежных шлюзов в SaaS-платформах. Цель работы – разработать аналитическую модель выбора, проектирования и внедрения E2E-проверок, которые связывают пользовательский путь оплаты, API внешнего провайдера, внутренний биллинг и состояние доступа к продукту. Методология основана на сравнительном анализе уровней тестового покрытия, тематическом синтезе публикаций 2021–2026 гг., логико-структурном моделировании платежного сценария и обобщении отраслевой QA-практики. В результате разграничены API, интеграционные, регрессионные и сквозные проверки, определено место E2E-тестов в цепочке PR, dev, beta и production-контроля, предложена риск-ориентированная схема отбора платежных сценариев. В модель включены регуляторно обусловленные ветви EMV 3-D Secure, усиленной аутентификации клиента и ограничения PCI DSS, определяющие допустимые тестовые данные и границы платежного контура. Обоснована целесообразность автоматизации основных способов оплаты, сценариев подписки, отказа, возврата и повторной попытки. Полученная модель ориентирована на команды, которым требуется сократить ручной регресс, сохранить диагностичность падений, отделить дефекты интерфейса от ошибок биллинга и выстроить единые критерии готовности релиза.

Библиографическое описание: Кузнецов Д. Методологии автоматизации сквозного тестирования при интеграции платежных шлюзов в SAAS-платформах // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23504

Практическая значимость результатов связана с построением устойчивого QA-процесса в SaaS-продуктах, где платежный шлюз сопряжен с биллингом, подписками, пользовательским интерфейсом и релизными решениями в условиях частых продуктовых обновлений SaaS.

Abstract

This study examines end-to-end testing automation methodologies for integrating payment gateways into SaaS platforms. The goal of the study is to develop an analytical model for selecting, designing, and implementing E2E checks that link user payment flows, external provider APIs, internal billing, and product access status. The methodology is based on a comparative analysis of test coverage levels, a thematic synthesis of publications from 2021–2026, logical-structural modeling of payment scenarios, and a summary of industry QA practices. As a result, the study distinguishes API, integration, regression, and end-to-end checks, defines the role of E2E tests across pull request, development, beta, and production stages, and proposes a risk-based framework for selecting payment scenarios. The model also incorporates EMV 3-D Secure branches, strong customer authentication conditions, and PCI DSS constraints on test data and payment-environment scope. It also identifies automation priorities for primary payment methods and for subscription, decline, refund, and retry flows. The resulting model is intended for teams seeking to reduce manual regression effort, preserve failure diagnosability, separate interface defects from billing errors, and establish consistent release-readiness criteria. The practical significance of the results lies in building a sustainable QA process in SaaS products, where the payment gateway is integrated with billing, subscriptions, user interface, and release solutions in the context of frequent SaaS product updates.

Ключевые слова: сквозное тестирование, E2E, платежный шлюз, SaaS, автоматизация тестирования, биллинг, CI/CD, PCI DSS, EMV 3-D Secure, усиленная аутентификация клиента.

Keywords: end-to-end testing, E2E, payment gateway, SaaS, test automation, billing, CI/CD, PCI DSS, EMV 3-D Secure, strong customer authentication.

Введение

Интеграция платежного шлюза в SaaS-платформу связывает интерфейс продукта, внутренний биллинг, API внешнего провайдера, callback-уведомления, статус подписки и доступ к платному функционалу. Проверка отдельного запроса дает ограниченную картину: API возвращает корректный ответ, при этом пользовательский путь завершается ошибкой из-за расхождения статусов, задержки webhook, неверной маршрутизации или сбоя обновления данных в биллинге.

Цель исследования – разработать аналитическую модель автоматизации E2E-тестирования платежных шлюзов в SaaS-платформах с учетом микросервисной архитектуры, регрессионного цикла и релизного пайплайна. Первая задача состоит в разграничении API, интеграционных, регрессионных и сквозных проверок в платежном процессе. Вторая задача связана с определением места E2E-тестов в цепочке PR, dev-среды, beta-релиза и production-контроля. Третья задача направлена на построение прикладной модели внедрения E2E-автоматизации с учетом бизнес-критичности способов оплаты, стоимости поддержки тестов

и стабильности окружения. Четвертая задача состоит в определении регуляторно обусловленных ветвей E2E-проверки, связанных с EMV 3-D Secure, усиленной аутентификацией клиента, или SCA, и границами PCI DSS-скоупа тестовой среды.

Новизна работы состоит в риск-ориентированной модели E2E-автоматизации платежных шлюзов, которая связывает пользовательское действие, API- и контрактные проверки, результат внешней транзакции, состояние биллинга, доступ к SaaS-продукту и релизное решение. В состав модели включены ветви 3-D Secure и SCA, а ограничения PCI DSS рассматриваются как условия выбора тестовых данных, формирования отчетных артефактов и разграничения SaaS-компонентов и среды обработки карточных данных, исходное предположение состоит в том, что практическая ценность E2E-набора определяется охватом критичных платежных переходов.

Материалы и методы

Корпус формировался посредством поиска в Google Scholar и Crossref Metadata Search, а также в издательских и институциональных каталогах IEEE Xplore, SpringerLink, MDPI, SciUp и WebThesis Politecnico di Torino. Поисковые запросы объединяли термины “end-to-end testing”, “E2E testing”, “payment gateway”, “digital payments”, “SaaS”, “API testing”, “integration testing”, “microservices”, “CI/CD” и “regression testing”, а также их русскоязычные соответствия. Отбор проводился последовательно по названию, аннотации и полному тексту.

В корпус включались работы 2021–2026 гг., непосредственно рассматривающие автоматизацию веб- и API-тестирования, взаимодействие микросервисов, E2E-покрытие, регрессию финансовых продуктов, CI/CD-пайплайны либо параметризацию платежных сценариев. Исключались дублирующиеся публикации, материалы, ограниченные модульным тестированием, обзорные тексты без описания метода и коммерческие страницы инструментов. Итоговый научно-технический корпус составили десять работ [1–6, 10–13]. Документы PCI SSC, EMVCo и Европейского союза [7–9] включались независимо от года публикации, поскольку они определяют действующие требования к данным платежных карт, процедурам аутентификации и исключениям из SCA.

Сравнительный анализ применялся для разграничения API-, интеграционных, регрессионных и сквозных проверок, тематический синтез связывал выводы работ по микросервисам, CI/CD и финансовому тестированию с платежным контуром SaaS-платформы, логико-структурное моделирование представляло E2E-сценарий как последовательность переходов между интерфейсом, платежным провайдером, механизмом аутентификации, биллингом и системой управления доступом, риск-ориентированная классификация использовалась при отборе способов оплаты, негативных ветвей и наборов, запускаемых на разных стадиях релиза.

Результаты

Автоматизация платежных интеграций начинается с разграничения уровней проверки. API-тест подтверждает корректность запроса, параметров, ответа и статуса. Интеграционный тест проверяет обмен между сервисами. Регрессионный набор снижает риск повторного дефекта после изменения кода. Сквозной тест проводит сценарий через цепочку действий,

близкую к пользовательскому пути, и фиксирует состояние продукта после оплаты. В работах по API-тестированию микросервисов надежность взаимодействия сервисов связывается с контролем контрактов и форматов обмена данными [1]. Для платежного шлюза этого слоя хватает только для части задачи, поскольку платеж проходит через выбор способа оплаты, внешнюю форму, возврат в продукт, webhook, биллинг и права доступа.

Автоматизированный тест веб-приложения ценен при повторяемой проверке пользовательских действий и результата [2]. В платежном сценарии автотест фиксирует цепочку после клика по кнопке оплаты: тариф передан в биллинг, шлюз получил ожидаемые параметры, транзакция завершилась заданным статусом, SaaS-платформа обновила подписку, пользователь получил доступ. E2E-сценарий связывает технический ответ сервиса с бизнес-результатом.

В микросервисной архитектуре платежный дефект часто возникает на стыке сервисов. Работы по интеграционному тестированию выделяют контрактные и API-проверки как средство согласования обмена между сервисами [3]. При интеграции платежного шлюза этот подход закрывает форматный риск, но ошибки завершения сценария остаются отдельной зоной контроля. Биллинг формирует корректный запрос, шлюз возвращает валидный ответ, затем пользователь получает неверный статус из-за ошибки redirect URL, повторного callback, гонки обновлений или неполного отображения результата.

DevOps-подходы связывают тестирование с быстрой обратной связью после изменения кода [4]. В платежных интеграциях команда QA соотносит тип изменения с глубиной проверки. На pull request запускаются быстрые API и smoke-проверки платежного контура. После слияния в dev-среду выполняется E2E-сценарий для основных способов оплаты. На beta-этапе проводится регрессия критичных платежных сценариев. Production-контроль ограничивается безопасными синтетическими сценариями и мониторингом без реального списания.

Регрессионный контроль в финтех-продуктах опирается на отбор сценариев по риску, частоте изменений и бизнес-критичности [5]. В SaaS-платформе это ведет к приоритету основных способов оплаты, подписки, первичной покупки, продления, отказа, возврата, смены тарифа и повторной попытки. Редкие варианты оплаты сохраняются в карте рисков и переносятся в периодический или ручной контроль, если автоматизация требует высокой поддержки при низкой частоте использования.

Исследователи E2E-покрытия микросервисных систем указывают, что пользовательский сценарий через интерфейс оставляет часть внутренних endpoint-ов без подтвержденного охвата [6]. Для платежных шлюзов это означает потребность в логах, трассировке, перехвате сетевых запросов, correlation ID, проверке статусов в биллинге и отчете по покрытым сервисным переходам. Зеленый happy path подтверждает покупку, но отказ банка, истечение сессии, повторный callback, рассинхронизация статусов и отложенная активация подписки требуют отдельных ветвей.

На рисунке 1 представлена обобщенная схема E2E-сценария оплаты в SaaS-платформе. Схема сохраняет абстрактный уровень описания конкретного продукта и фиксирует типовую логику проверки, где автотест проходит путь пользователя и сверяет состояние внутренних сервисов.

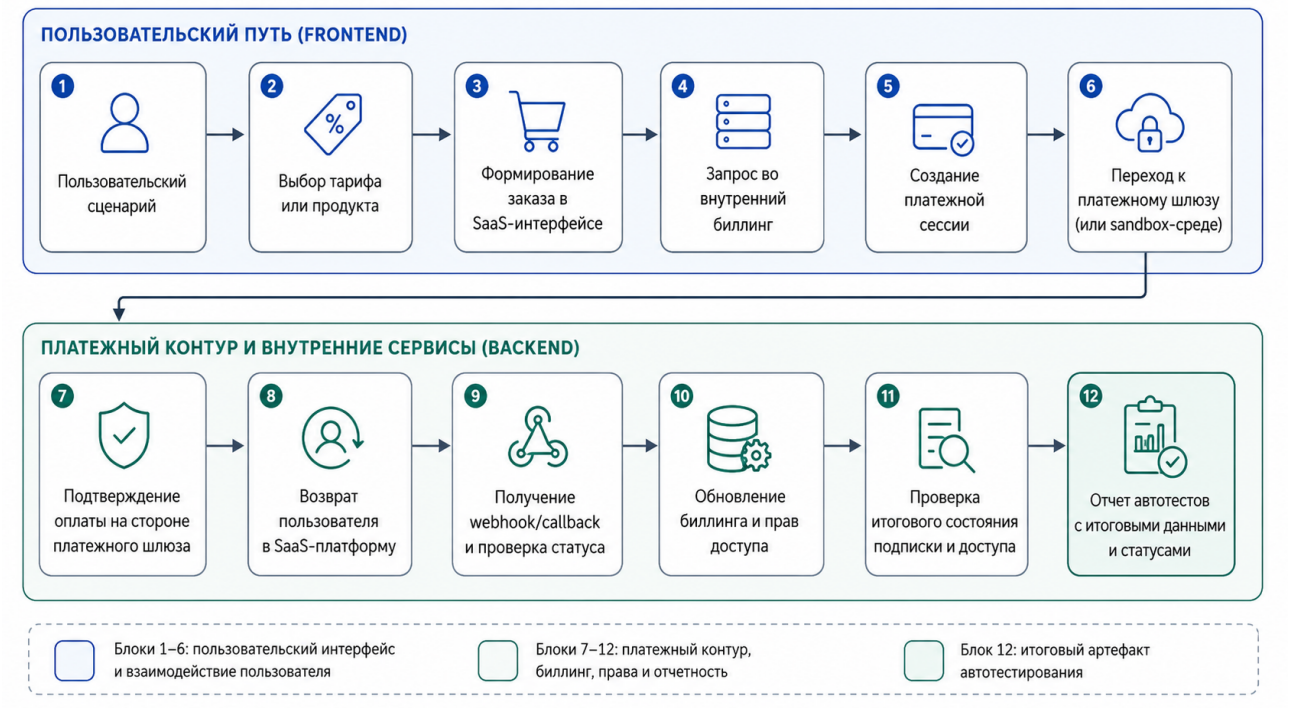


Рисунок 1. Логика автоматизированного E2E-сценария оплаты в SaaS-платформе (составлено автором)

Исследование интеграционных тестов в домене цифровых платежей обосновывает параметризуемый сценарий, где один платежный процесс проверяется с разными входными данными, типами платежей и ожидаемыми статусами [10]. Для SaaS-платформы это означает построение фреймворка через переиспользуемые сценарии. Команда задает базовый сценарий и варьирует способ оплаты, валюту, статус ответа, тип операции, сохраненное платежное средство, подписочный цикл, повторную попытку, refund или отмену.

Систематический обзор непрерывной интеграции связывает CI с качеством обратной связи, координацией команд, сборками и выявлением интеграционных проблем [11]. В платежных шлюзах E2E-тест нужен разработчикам, QA и владельцам продукта до продвижения сборки на следующий стенд. Пайплайн задает правило: какие платежные сценарии блокируют релиз, какие требуют ручного подтверждения, какие переходят в мониторинг после выпуска.

Исследование эволюции CI/CD-пайплайнов фиксирует регулярную перестройку конфигураций, многоинструментальность и изменение состава стадий [12]. Платежная интеграция меняется вместе с SDK, API-версиями, правилами 3-D Secure, webhook-событиями, интерфейсом платежной формы, токенизацией и обработкой отказов. Поэтому инженеры выносят UI-логику в page object или screen object, операции биллинга в API-клиент, работу со шлюзом в gateway adapter, подготовку данных в фабрики и результат прогона в единый отчет.

Работа по автоматическому веб-тестированию с curiosity-driven reinforcement learning рассматривает поиск сложных последовательностей действий, где дефекты возникают при нестандартных комбинациях поведения [13]. Для платежных интеграций это проявляется в отказах и повторах: пользователь закрывает платежную вкладку, возвращается назад,

меняет способ оплаты, получает pending-статус или пытается оплатить уже созданный заказ. Поэтому автоматизация платежей требует стабильных регрессионных сценариев и ограниченного набора исследовательских сценариев.

Сопоставление источников показывает, что платежный процесс требует многослойного теста: API-контракты и схемы данных [1, 3], охват внутренних переходов [6], параметризация статусов и платежных типов [10], проверка нестандартных пользовательских последовательностей [13]. Практический принцип состоит в построении матрицы сценариев. Первая ось описывает пользовательский путь: первая оплата, продление подписки, смена тарифа, отказ, возврат, повторная попытка. Вторая ось задает платежный механизм: банковская карта, сохраненное платежное средство, альтернативный метод, sandbox-статус. Третья ось фиксирует системный результат: статус транзакции, запись в биллинге, webhook, доступ пользователя, уведомление, отчетность.

Практическая ценность E2E-подхода раскрывается через контроль платежного поведения SaaS-продукта. Gateway обрабатывает транзакцию, затем платформа активирует подписку, применяет скидку, сохраняет идентификатор плательщика и переводит заказ в итоговый статус. Поэтому критерий успешности теста включает платежное событие и внутреннее состояние продукта. Методология E2E-автоматизации строится вокруг платежного риска. Выбор Playwright, Selenium, REST Assured или иного инструмента относится к реализации. Основу решения задают пользовательский путь, фиксируемые системные переходы, корректное состояние биллинга и правило блокировки релиза. Инженеры подбирают инструмент после описания сценариев.

Прикладная модель начинается с инвентаризации платежных сценариев: первичная покупка, подписка, продление, отмена, возврат, downgrade, upgrade, промокод, отказ банка, pending-статус, истечение сессии и повторная попытка. Затем команда отбирает приоритетные варианты по частоте использования, финансовым последствиям дефекта, влиянию на доступ пользователя, сложности воспроизведения и стабильности среды. Базовый E2E-набор формируется из малочисленных и надежных сценариев. Таблица 1 сопоставляет этапы внедрения, техническую реализацию и управленческий результат.

Таблица 1. Модель внедрения E2E-автоматизации платежных шлюзов в SaaS-платформе

Этап	Содержание решения	Результат для QA-процесса
Карта платежных сценариев	Описание покупки, подписки, отказа, возврата и продления	Отбор автотестов по риску
Приоритизация сценариев	Выбор главных способов оплаты и операций	Сокращение нагрузки на регрессию
Проектирование тестового слоя	Разделение UI, API, billing и gateway adapter	Снижение зависимости тестов от изменений интерфейса
Включение в CI/CD	Запуск разных наборов на PR, dev, beta и production	Контроль релизных переходов
Наблюдаемость и сопровождение	Логи, запросы, статусы, ревизия сценариев и данных	Быстрый разбор дефектов и устойчивость набора

Следующий блок связан с метриками. Без измеримых признаков E2E-набор превращается в перечень зеленых и красных прогонов, которые трудно сопоставить с релизным риском. Метрики нужны для решений: какой тест блокирует релиз, какой получает статус flaky, какой выводится из набора, какой сценарий команда переносит в ручную проверку.

Таблица 2. Метрики контроля E2E-тестирования платежных интеграций

Группа метрик	Показатель	Практическая интерпретация
Покрытие путей	Доля критичных сценариев в автоматизации	Зависимость релиза от ручного регресса
Стабильность	Доля flaky-тестов	Потребность в ревизии локаторов, ожиданий и данных
Скорость обратной связи	Время прохождения E2E-набора	Решение о разделении smoke и beta-регрессии
Диагностичность	Доля падений с полными артефактами	Скорость локализации дефекта
Биллинг-корректность	Совпадение статуса транзакции и состояния подписки	Выявление ошибок синхронизации и бизнес-правил
Регуляторное покрытие	Доля обязательных 3DS/SCA-ветвей, включенных в E2E-набор	Риск пропуска ошибок аутентификации и перехода к платежу
Безопасность артефактов	Доля прогонов без чувствительных карточных данных в логах, скриншотах и отчетах	Риск расширения платежного контура и утечки тестовых данных

Отдельную группу образуют сценарии, состав которых определяется правилами обращения с платежными данными и процедурой аутентификации. В этом блоке E2E-тест контролирует поведение интеграции в точках, где нормативное требование изменяет пользовательский путь, допустимые данные либо ожидаемый статус операции. PCI DSS v4.0.1 используется для определения границ платежной среды и состава тестовых артефактов. EMV 3-D Secure задает ветви frictionless и challenge, а для операций, подпадающих под PSD2, отдельно проверяется обработка SCA и применимых исключений [7–9].

Таблица 3. Контрольные точки E2E-тестирования платежной интеграции в SaaS-платформе

Условие	Проверяемая E2E-ветвь	Контрольные точки
Граница PCI DSS-скоупа	Переход на hosted payment page, iframe либо API провайдера	карточные данные не проходят через компоненты, объявленные вне платежного контура, в логах и отчетах отсутствуют чувствительные значения, используются sandbox-карты, токены и синтетические идентификаторы
3DS frictionless flow	Аутентификация завершается без действия пользователя	корректно получен результат аутентификации; платеж продолжен один раз; биллинг и подписка обновлены после итогового статуса
3DS challenge flow	Перенаправление либо встроенная форма challenge	проверяются успешное завершение, отмена, тайм-аут, ошибка ACS, возврат в SaaS-продукт и отсутствие дублирующей транзакции
Исключение из SCA	Провайдер принимает либо отклоняет запрос исключения	принятый exemption не нарушает завершение платежа, после отклонения выполняется переход к challenge, статусы аутентификации и транзакции не смешиваются

Условие	Проверяемая E2E-ветвь	Контрольные точки
Подписка и повторяющийся платеж	Первичное подтверждение платежного средства и последующая операция	проверяются токенизация, связь с исходным согласием, идемпотентность, изменение статуса подписки и обработка отказа
Отложенный callback	Webhook поступает после возврата пользователя	интерфейс не показывает окончательный успех до подтвержденного состояния, повторный callback не создает второй заказ или повторный доступ

Практический алгоритм внедрения состоит из семи шагов. Команда описывает платежный ландшафт SaaS-платформы, выделяет критичные сценарии, проектирует тестовый слой, создает стабильные тестовые данные, включает проверки в пайплайн, настраивает отчетность и пересматривает набор по данным релизов, дефектов и flaky-падений. Платежный домен задает ограничения автоматизации. Sandbox внешнего провайдера воспроизводит production-поведение частично. Chargeback, антифрод-блокировка и часть банковских отказов плохо подходят для стабильного автоматического прогона. Поэтому проверка строится по согласованным точкам: redirect, callback, статус операции, запись в биллинге, доступ пользователя и отчетные артефакты.

Стандартизация QA-процессов при росте команды требует документации, перечня обязательных релизных проверок и обмена сведениями между QA-инженерами. Для платежных интеграций нужен единый реестр сценариев с ограничениями sandbox, правилами тестовых данных, ожидаемыми статусами, известными блокерами и зонами ручного контроля. Параллельный запуск относится к этапу масштабирования. Если платежный E2E-набор мал, распределение по контейнерам усложняет инфраструктуру без заметного выигрыша. При росте набора параллелизация становится рациональной после стабилизации данных, изоляции сценариев и устранения зависимости тестов друг от друга.

Прикладное решение состоит в привязке E2E-теста к платежному обещанию продукта. Пользователь SaaS-платформы ожидает предсказуемый результат: оплата прошла, доступ открыт, статус понятен, повторная попытка проходит без дубля, отказ завершается понятным состоянием заказа. Автоматический тест проверяет этот результат через сетевые запросы, статус транзакции, запись биллинга, событие подписки и конечное состояние аккаунта.

Обсуждение

Предложенная модель отличается от подходов, в которых покрытие оценивается только по числу вызванных endpoint-ов. Для платежного процесса критичен не сам факт прохождения запроса, а согласованность нескольких состояний: внешней транзакции, webhook-события, записи биллинга, подписки и доступа пользователя. Метрики E2E- и API-покрытия [6] сохраняют диагностическую ценность, если один технически корректный переход сопровождается ошибочным состоянием продукта.

Риск-ориентированный отбор согласуется с подходами к регрессии финансовых продуктов [5], поскольку одинаковое расширение автоматизации не дает сопоставимого эффекта для всех платежных ветвей. Основные способы оплаты, первичная активация подписки, продление, отказ, возврат и повторная попытка воздействуют на выручку и доступ

к продукту непосредственно. Редкие методы оплаты либо нестабильные sandbox-сценарии могут сохраняться в периодическом контроле, если стоимость их сопровождения превышает диагностическую пользу каждого прогона.

Регуляторный слой меняет состав проверяемых ветвей. PCI DSS задает ограничения на границы среды и тестовые данные, EMV 3-D Secure разделяет аутентификацию на frictionless и challenge flows, а нормы SCA требуют различать применение аутентификации, запрос исключения и переход к challenge после отклонения исключения [7–9]. Поэтому успешный код платежной операции не считается достаточным результатом, пока не проверены исход аутентификации, возврат пользователя, идемпотентность callback и соответствие состояния подписки выполненной операции.

Расширение E2E-набора увеличивает продолжительность прогонов и число зависимостей от внешних систем. Компактный набор критичных сценариев сохраняет связь с пользовательским результатом, тогда как контрактные, API- и компонентные проверки локализуют дефекты на более низких уровнях.

Ограничения исследования

Предложенная модель построена на неоднородном корпусе, объединяющем журнальные статьи, конференционные материалы, отраслевые нормативно-технические документы, состав не дает единой базы для количественной оценки сокращения ручного регресса, длительности прогонов или числа предотвращенных дефектов.

Поведение sandbox-сред различается у платежных провайдеров. Часть банковских отказов, антифрод-решений, chargeback-событий и задержек callback воспроизводится только приближенно, поэтому состав автоматизируемых ветвей зависит от возможностей конкретного шлюза. Модель также требует адаптации к способу интеграции. Hosted payment page, iframe, прямое API-взаимодействие и токенизированные операции формируют разные границы платежного контура.

Положения о SCA относятся прежде всего к операциям, подпадающим под европейское платежное регулирование, для других юрисдикций матрица сценариев должна учитывать локальные правила аутентификации и требования платежных систем. PCI DSS определяет требования к защите платежных данных, но E2E-функциональный тест сам по себе не подтверждает соответствие организации стандарту.

Заключение

Разграничены API, интеграционные, регрессионные и E2E-проверки. API-тесты фиксируют корректность запросов и форматов, интеграционные проверки контролируют взаимодействия между сервисами, регрессия снижает риск повторных дефектов. E2E-тест связывает эти уровни с пользовательским результатом оплаты. Определено место E2E-тестов в релизном цикле SaaS-платформы. На PR-этапе применяются быстрые проверки и контракты, на dev-среде – основной платежный сценарий, на beta-среде – расширенный регресс критичных сценариев, на production-этапе – безопасный мониторинг и синтетические проверки без раскрытия внутренних механизмов. Предложена прикладная модель внедрения, объединяющая карту платежных сценариев, риск-ориентированный отбор, разделение UI-,

API-, billing- и gateway-слоев, интеграцию в CI/CD, наблюдаемость и регулярную ревизию набора. Ценность E2E-автоматизации определяется охватом критичных переходов между пользовательским действием, платежным шлюзом, аутентификацией, биллингом и доступом к продукту, для платежей с 3-D Secure и SCA к этим переходам относятся исход аутентификации, возврат пользователя, обработка исключения и согласование статусов аутентификации и транзакции. Практическая применимость модели зависит от возможностей sandbox-среды, наблюдаемости внутренних сервисов и регулярного пересмотра карты рисков.

Список литературы

1. Васильев Б.Я. Методика тестирования API в микросервисной архитектуре продукта // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2025. – № 4–1 (103). – С. 154–159. – DOI: 10.24412/2500-1000-2025-4-1-154-159.
2. Козмин В.С. Разработка и использование автоматизированных тестов для веб-приложения // Вестник науки. – 2025. – Т. 3, № 6 (87). – С. 1798–1803.
3. Мурашкин И.Н. Методологии интеграционного тестирования в микросервисной архитектуре // Научный журнал. – 2024. – № 3 (70). – С. 1–3.
4. Тюменцев Д.В. Автоматизация тестирования в DevOps: подходы и лучшие практики // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2024. – № 2–2 (89). – С. 156–159. – DOI: 10.24412/2500-1000-2024-2-2-156-159.
5. Хапанков А.С. Автоматизация регрессионного тестирования в быстро меняющихся средах разработки финансовых продуктов // Информатика. Экономика. Управление. – 2026. – Т. 5, № 1. – С. 1025–1032. – DOI: 10.47813/2782-5280-2026-5-1-1025-1032.
6. Abdelfattah A.S., Cerny T., Yero J., Song E., Taibi D. Test Coverage in Microservice Systems: An Automated Approach to E2E and API Test Coverage Metrics // Electronics. – 1913. – T. 13, № 10. – Art. 1913. – DOI: 10.3390/electronics13101913.
7. Commission Delegated Regulation (EU) 2018/389 of 27 November 2017 supplementing Directive (EU) 2015/2366 with regard to regulatory technical standards for strong customer authentication and common and secure open standards of communication // Official Journal of the European Union. – 2023. – № L 69. – P. 23–43.
8. EMVCo. EMV 3-D Secure Protocol and Core Functions Specification. Version 2.3.1.1. EMVCo. – EMVCo. – 2023.
9. PCI Security Standards Council. Payment Card Industry Data Security Standard: Requirements and Testing Procedures. Version 4.0.1. Wakefield, MA: PCI Security Standards Council. – Wakefield, MA: PCI Security Standards Council. – 2024.
10. Ruggirello V. A Groovy-based Domain-Specific Language for Digital Payment System End-to-End Testing: Master’s thesis. – Turin: Politecnico di Torino, 2025. – 92 P.
11. Soares E., Sizilio G., Santos J., Alencar D., Kulesza U. The Effects of Continuous Integration on Software Development: A Systematic Literature Review // Empirical Software Engineering. – 2022. – T. 27. – DOI: 10.1007/s10664-021-10114-1.

12. Zampetti F., Geremia S., Bavota G., Di Penta M. CI/CD Pipelines Evolution and Restructuring: A Qualitative and Quantitative Study // 2021 IEEE International Conference on Software Maintenance and Evolution. – 2021. – P. 471–482. – DOI: 10.1109/ICSME52107.2021.00048.
13. Zheng Y., Liu Y., Xie X., Liu Y., Ma L., Hao J., Liu Y. Automatic Web Testing Using Curiosity-Driven Reinforcement Learning // 2021 IEEE/ACM 43rd International Conference on Software Engineering. – 2021. – P. 423–435. – DOI: 10.1109/ICSE43902.2021.00048.

References

1. Vasilev B.Ya. [API testing methodology in product microservice architecture] // Mezhdunarodnyy zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk. – 2025. – No. 4–1 (103). – P. 154–159. – DOI: 10.24412/2500-1000-2025-4-1-154-159. (In Russ.).
2. Kozmin V.S. [Development and use of automated tests for a web application] // Vestnik nauki. – 2025. – Vol. 3, No. 6 (87). – P. 1798–1803. (In Russ.).
3. Murashkin I.N. [Methodologies of integration testing in microservice architecture] // Nauchnyy zhurnal. – 2024. – No. 3 (70). – P. 1–3. (In Russ.).
4. Tyumentsev D.V. [Automation of testing in DevOps: approaches and best practices] // Mezhdunarodnyy zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk. – 2024. – No. 2–2 (89). – P. 156–159. – DOI: 10.24412/2500-1000-2024-2-2-156-159. (In Russ.).
5. Khapankov A.S. [Automation of regression testing in rapidly changing environments for financial product development] // Informatika. Ekonomika. Upravlenie. – 2026. – Vol. 5, No. 1. – P. 1025–1032. – DOI: 10.47813/2782-5280-2026-5-1-1025-1032. (In Russ.).
6. Abdelfattah A.S., Cerny T., Yero J., Song E., Taibi D. Test Coverage in Microservice Systems: An Automated Approach to E2E and API Test Coverage Metrics // Electronics. – 1913. – Vol. 13, No. 10. – Art. 1913. – DOI: 10.3390/electronics13101913.
7. Commission Delegated Regulation (EU) 2018/389 of 27 November 2017 supplementing Directive (EU) 2015/2366 with regard to regulatory technical standards for strong customer authentication and common and secure open standards of communication // Official Journal of the European Union. – 2023. – P. 23–43.
8. EMVCo. EMV 3-D Secure Protocol and Core Functions Specification. Version 2.3.1.1. EMVCo. Vol. 2.3.1.1. – EMVCo, 2023.
9. PCI Security Standards Council. Payment Card Industry Data Security Standard: Requirements and Testing Procedures. Version 4.0.1. Wakefield, MA: PCI Security Standards Council. Vol. 4.0.1. – Wakefield, MA: PCI Security Standards Council, 2024.
10. Ruggirello V. A Groovy-based Domain-Specific Language for Digital Payment System End-to-End Testing: Master’s thesis. – Turin: Politecnico di Torino, 2025. – 92 P.
11. Soares E., Sizilio G., Santos J., Alencar D., Kulesza U. The Effects of Continuous Integration on Software Development: A Systematic Literature Review // Empirical Software Engineering. – 2022. – Vol. 27. – DOI: 10.1007/s10664-021-10114-1.

12. Zampetti F., Geremia S., Bavota G., Di Penta M. CI/CD Pipelines Evolution and Restructuring: A Qualitative and Quantitative Study // 2021 IEEE International Conference on Software Maintenance and Evolution. – 2021. – P. 471–482. – DOI: 10.1109/ICSME52107.2021.00048.
13. Zheng Y., Liu Y., Xie X., Liu Y., Ma L., Hao J., Liu Y. Automatic Web Testing Using Curiosity-Driven Reinforcement Learning // 2021 IEEE/ACM 43rd International Conference on Software Engineering. – 2021. – P. 423–435. – DOI: 10.1109/ICSE43902.2021.00048.

Статья поступила в редакцию: 10.10.2026
Статья принята к публикации: 17.10.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 629.7+681.5+621.396

DOI: 10.32743/UniTech.2026.151.10.23582

Разработка адаптивного расширенного фильтра Калмана для оценки состояния беспилотного летательного аппарата с использованием недорогих датчиков IMU/GNSS в условиях ухудшения сигнала GPS

Ле Куи Ань
магистр техн. наук, Факультет авиационного оборудования Военно-воздушное училище
Вьетнам, г. Нячанг
E-mail: lequyanh.bmstu@gmail.com

Ле Нгок Ан
магистр технических наук
Факультет авиационного оборудования Военно-воздушное училище
Вьетнам, г. Нячанг

Development of an Adaptive Extended Kalman Filter for UAV state estimation using low-cost IMU/GNSS sensors under GPS signal degradation conditions

Le Quy Anh
master of Technical Sciences, Faculty of Aviation Equipment Air Force Officer Training School
Vietnam, Nha Trang

Le Ngoc An
master of Technical Sciences, Faculty of Aviation Equipment Air Force Officer Training School
Vietnam, Nha Trang

Аннотация

В статье предлагается адаптивный расширенный фильтр Калмана (Adaptive Extended Kalman Filter – AEKF) для повышения точности оценки состояния беспилотного летательного аппарата (БПЛА) при интеграции недорогих инерциальных датчиков IMU и спутниковой навигационной системы GNSS в условиях ухудшения сигнала GPS. Основная проблема заключается в накоплении ошибок недорогих микроэлектромеханических датчиков и снижении достоверности спутниковых измерений при воздействии помех. В отличие от классического расширенного фильтра Калмана (EKF), использующего постоянную ковариационную матрицу шума измерений, предлагаемый алгоритм анализирует последовательность инноваций и адаптивно корректирует матрицу ковариации R_k в зависимости от качества поступающих измерений. Исследование основано на обработке

Библиографическое описание: Ле К.А., Ле Н.А. Разработка адаптивного расширенного фильтра Калмана для оценки состояния беспилотного летательного аппарата с использованием недорогих датчиков IMU/GNSS в условиях ухудшения сигнала GPS // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23582

данных реального полёта БПЛА. Для количественной оценки точности используется эталонная траектория, полученная с помощью независимой двухчастотной системы RTK-GNSS. Продолжительность рассматриваемого полётного сценария составляет 300 с, а интервал ухудшения качества сигнала GPS – от 150 до 210 с. Для адаптивной оценки ковариации используется скользящее окно размером N = 15. Результаты сравнения показывают, что максимальная ошибка определения положения уменьшается с 98,93 м для EKF до 68,82 м для AEKF, что соответствует снижению на 30,44 %. Среднеквадратичная ошибка уменьшается с 25,94 до 17,73 м, то есть на 31,67 %. Полученные результаты подтверждают эффективность адаптивной коррекции ковариации измерений для повышения точности оценки положения БПЛА при ухудшении качества GPS-сигнала.

Abstract

This paper proposes an Adaptive Extended Kalman Filter (AEKF) to improve unmanned aerial vehicle (UAV) state estimation by integrating low-cost inertial measurement unit (IMU) sensors with a Global Navigation Satellite System (GNSS) under degraded GPS signal conditions. The main challenge is the accumulation of errors in low-cost micro-electromechanical system sensors and the reduced reliability of satellite measurements in the presence of interference. Unlike the conventional Extended Kalman Filter (EKF), which uses a fixed measurement-noise covariance matrix, the proposed algorithm analyses the innovation sequence and adaptively adjusts the measurement-noise covariance matrix R_k according to the quality of incoming measurements. The study is based on the processing and analysis of actual UAV flight data. An independent dual-frequency RTK-GNSS system provides the reference trajectory for quantitative accuracy evaluation. The considered flight scenario lasts 300 seconds, with degraded GPS signal quality during the interval from 150 to 210 seconds. A sliding window of N = 15 samples is used for adaptive covariance estimation. The comparison results show that the maximum position error decreases from 98.93 m with EKF to 68.82 m with AEKF, representing a reduction of 30.44 %. The root-mean-square position error decreases from 25.94 m to 17.73 m, corresponding to an improvement of 31.67 %. These results demonstrate the effectiveness of adaptive measurement-noise covariance adjustment in improving UAV position estimation accuracy when GPS signal quality deteriorates.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат (БПЛА), расширенный фильтр Калмана (EKF), интеграция IMU/GNSS, ухудшение качества сигнала GPS, адаптивный алгоритм.

Keywords: Unmanned Aerial Vehicle (UAV), Extended Kalman Filter (EKF), IMU/GNSS integration, GPS signal degradation, Adaptive algorithm.

I. Введение

В последние годы беспилотные летательные аппараты (БПЛА) играют ключевую роль во многих областях – от военного дела и разведки до картографирования и сельского хозяйства. Для выполнения автоматических или полуавтоматических полётных заданий БПЛА требуется высоконадёжная система навигации и оценки состояния. Наиболее распространённой в настоящее время является конфигурация, объединяющая глобальную навигационную спутниковую систему (GNSS/GPS) и инерциальный измерительный блок (IMU) [3].

Однако в малых и средних БПЛА обычно применяются недорогие микроэлектромеханические (MEMS) датчики IMU, позволяющие снизить стоимость и массу системы. Основным недостатком таких датчиков является дрейф, обусловленный случайными шумами и значительными смещениями нуля. В идеальных условиях сигналы GPS непрерывно корректируют ошибки IMU с помощью алгоритмов фильтрации, в частности расширенного фильтра Калмана (EKF) [6]. Напротив, в сложных условиях окружающей среды (например, при полёте в горных ущельях или районах плотной городской застройки), а также в условиях радиоэлектронного противодействия сигнал GPS может ослабляться или подвергаться помехам.

Традиционный фильтр EKF основан на предположении, что ковариационные матрицы шумов процесса (Q) и измерений (R) являются постоянными [6, 8, 9]. При ухудшении сигнала GPS это предположение перестаёт соответствовать реальным условиям. В результате система вынуждена опираться либо на дрейфующие данные IMU, либо на зашумлённые данные GPS, что может привести к расходимости фильтра и снижению безопасности полёта [4]. Поэтому настоящая статья посвящена разработке адаптивного расширенного фильтра Калмана (AEKF), способного автоматически оценивать качество входного сигнала GPS и корректировать матрицу шума измерений для уменьшения ошибки оценки состояния при кратковременном ухудшении спутникового позиционирования.

II. Материалы и методы

2.1. Кинематическая модель датчиков IMU/GNSS

Вектор состояния БПЛА в инерциальной навигационной системе (INS) обычно включает положение, скорость, углы ориентации и смещения датчиков [3]:

$$x = \begin{bmatrix} p^n \\ v^n \\ q \\ b_a \\ b_g \end{bmatrix} \quad (1)$$

Где p^n - вектор положения; v^n - вектор скорости в навигационной системе координат; q - кватернион, описывающий ориентацию БПЛА; b_a и b_g - смещения акселерометра и гироскопа соответственно.

Нелинейное уравнение состояния в непрерывном времени описывается выражением [6]:

$$\dot{x}(t) = f\,(x(t), u(t)) + w(t) \tag{2}$$

где $u(t)$ - входной сигнал IMU (линейное ускорение и угловая скорость), а $w(t)$ - шум процесса с ковариационной матрицей $\boldsymbol{Q}$.

2.2. Расширенный фильтр Калмана

Алгоритм EKF выполняет линеаризацию нелинейной модели посредством разложения в ряд Тейлора первого порядка [6, 8]. Его работа включает две основные фазы.

Фаза прогнозирования - на основе кинематической модели и данных IMU:

- Прогноз состояния: $\hat{x}_{k|k-1} = f(\hat{x}_{k-1|k-1}, u_k)$
- Прогноз ковариации ошибки: $P_{k|k-1} = F_k P_{k-1|k-1} F_k^T + Q_k$

Здесь F_k - матрица Якоби системы в момент времени k.

Фаза коррекции - на основе измерений GPS:

- Расчёт матрицы усиления Калмана: $K_k = P_{k|k-1} H_k^T \left(H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k\right)^{-1}$
- Коррекция состояния: $\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k(z_k - h\hat{x}_{k|k-1})$
- Коррекция ковариации: $P_{k|k} = (I - K_k H_k)\, P_{k|k-1}$

Здесь H_k - матрица Якоби модели наблюдения, а R_k – постоянная ковариационная матрица шума измерений [6].

2.3. Адаптивный расширенный фильтр Калмана

При наличии помех или ухудшении сигнала GPS постоянная матрица R_k традиционного EKF не отражает фактического качества измерений. Адаптивный механизм строится на анализе последовательности невязок инноваций [4, 7, 8]:

$$e_k = z_k - h(\hat{x}_{k|k-1}) \tag{3}$$

Теоретическая ковариационная матрица последовательности инноваций определяется как:

$$C_k = H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k \tag{4}$$

Система AEKF оценивает ковариационную матрицу по скользящему окну размером N [1]:

$$\widehat{C}_k = \frac{1}{N} \sum_{i=k-N+1}^{k} e_i e_i^T \tag{5}$$

На этой основе ковариационная матрица шума измерений обновляется в реальном времени:

$$\widehat{R}_k = \widehat{C}_k - H_k P_{k|k-1} H_k^T \tag{6}$$

Чтобы избежать потери положительной определённости вследствие выборочной ошибки при конечном размере окна *N*, к диагональным элементам применяется ограничение диапазона:

$$\widehat{R}_k(i,j) = max(\widehat{C}_k(i,j) - \left[H_k P_{k|k-1} H_k^T\right]_{(i,j)}, R_{\min}(i,j)) \quad (7)$$

где R_{min} - минимальный порог шума датчика, установленный производителем. При аномальном увеличении e_k оценка ковариации резко возрастает, вследствие чего R_k автоматически увеличивается, а усиление Калмана K_k приближается к нулю. Система отбрасывает ошибочные измерения GPS и автоматически опирается на кинематическую модель INS [1].

2.4. Методика исследования

Исследование проводилось с использованием двух методов: теоретического и экспериментального, что обеспечило комплексную оценку эффективности.

2.4.1. Теоретический метод исследования

Алгоритм AEKF реализован в программной среде компьютера для оценки его математической сходимости. Моделировались стандартные траектории полёта БПЛА; дополнительно вводились случайные шумы и случайные смещения, соответствующие техническим характеристикам датчика MPU-6050, чтобы проверить ограничения алгоритма. Также использовались математические функции, имитирующие задержку или ухудшение сигнала GPS.

2.4.2. Экспериментальная установка и данные

Проектирование аппаратной системы:

Описание аппаратной установки для сбора данных включает следующие компоненты:

- Центральный микроконтроллер: плата Arduino Uno. Несмотря на ограниченные возможности вычислений с плавающей точкой, Arduino Uno обеспечивает синхронизацию времени и считывание данных датчиков с малой задержкой.

- Инерциальная измерительная система: модуль MPU-6050, объединяющий трёхосевой акселерометр и трёхосевой гироскоп. Он подключается к Arduino по интерфейсу I²C с частотой дискретизации 100 Гц. Датчик имеет очень низкую стоимость, но характеризуется значительным дрейфом, зависящим от температуры и времени.

- Система позиционирования: модуль u-blox NEO-6M, подключённый к микроконтроллеру через UART со скоростью 9600 бит/с. Он предоставляет данные о положении (широта, долгота, высота) с частотой обновления 1-5 Гц.

- Эталонный блок данных: для точной количественной оценки ошибки положения БПЛА дополнительно оснащён независимой двухчастотной системой дифференциального позиционирования RTK-GNSS, работающей совместно с наземной базовой станцией (Base) и обеспечивающей динамическую точность позиционирования 2,5 см. Траектория, полученная с помощью RTK, используется в качестве истинной траектории для проверки результатов EKF и AEKF.

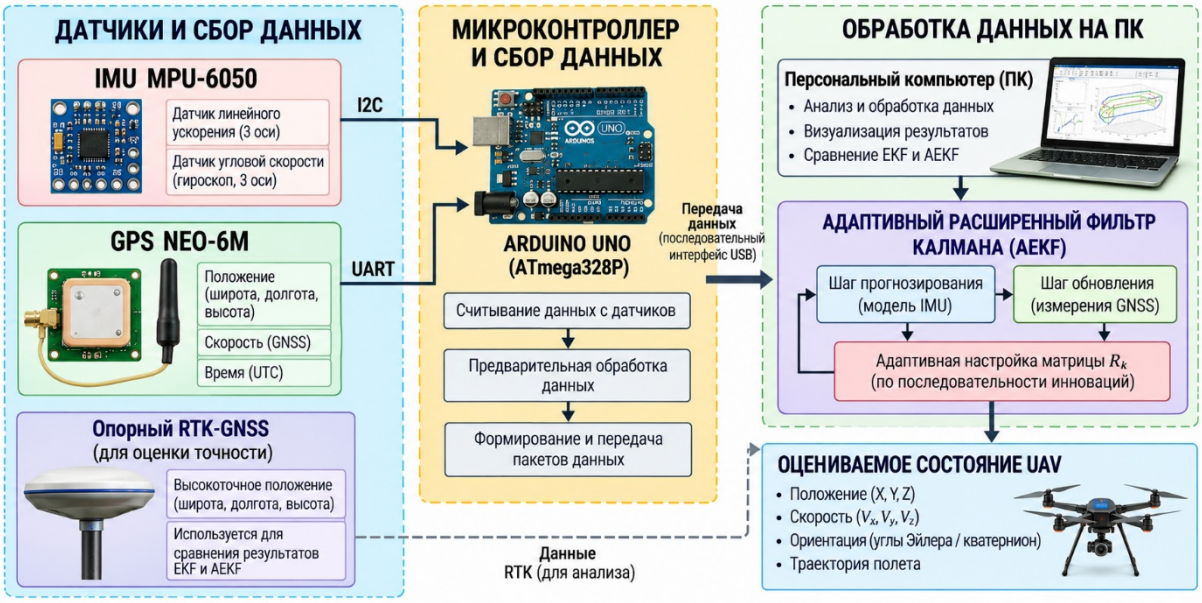


Рисунок 1. Структурная схема аппаратных средств сбора данных и потока обработки алгоритма AEKF

III. Результаты и обсуждение

Для проверки адаптивных свойств фильтра AEKF по сравнению с традиционным EKF в условиях внезапного появления помех измерений сравнительный сценарий оценки был задан следующими параметрами.

Продолжительность испытательного полёта составляла 300 секунд; эталонная траектория представляла собой эллипс с большой полуосью 450 м и малой полуосью 250 м. Для оценки устойчивости системы в интервале от 150-й до 210-й секунды задавался участок с ухудшенными условиями приёма GPS. В этой области сигнал GPS от NEO-6M не исчезал полностью, но существенно ухудшался и ослаблялся, вследствие чего в полученных координатах появлялись выбросы со значительными случайными отклонениями.

Адаптивный механизм: фильтр AEKF использовал скользящее окно размером N = 15 для обновления ковариационной матрицы шума измерений в реальном времени.

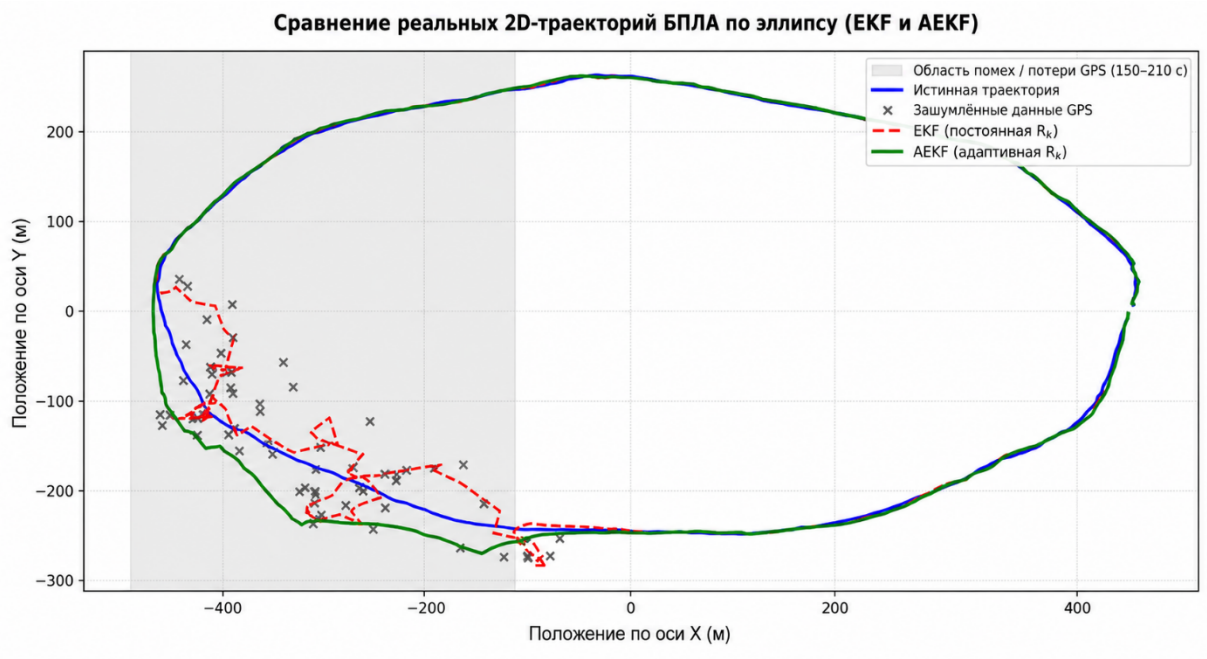


Рисунок 2. Сравнение траекторий полёта

На рис. 2 показана двумерная траектория полёта БПЛА в плоскости X-Y: сравниваются эталонная траектория, полученная от контрольной системы RTK, и траектории, оценённые фильтрами.

Для фильтра EKF (постоянная R_k): поскольку доверие к сигналу GPS остаётся неизменным даже при сильном искажении данных в интервале от 150-й до 210-й секунды, оценённая траектория EKF значительно отклоняется от реальной и демонстрирует сильные колебания (красная линия).

Для фильтра AEKF (адаптивная R_k): при резком росте ошибки GPS большая инновационная невязка приводит к автоматическому увеличению оценки ковариации. Благодаря этому фильтр уменьшает вес зашумлённого GPS и в большей степени опирается на модель прогнозирования состояния. В результате оценённая траектория лучше соответствует эталонной и быстро стабилизируется после восстановления сигнала (зелёная линия).

Количественная оценка ошибки определения положения



Рисунок 3. Оценка ошибки

Количественные статистические результаты сравнения ошибок определения положения для EKF и AEKF представлены в таблице 1.

Таблица 1. Сравнение ошибок двух методов

Метод	**Конфигурация параметра**	**Максимальное отклонение (м)**	**Среднеквадратичная ошибка (м)**
EKF	R_k - постоянная	98,93	25,94
AEKF	R_k - адаптивная	68,82	17,73
Улучшение	-	30,44%	31,67%

3.1. Обсуждение результатов

На основании экспериментальных графиков и статистических данных можно сделать следующие выводы:

- Максимальная ошибка уменьшилась с 98,93 м для EKF до 68,82 м для AEKF, что соответствует улучшению на 30,44 %.

- Среднеквадратичная ошибка снизилась с 25,94 м до 17,73 м, что соответствует улучшению на 31,67 %.

Эти показатели подтверждают, что интеграция механизма адаптивного обновления ковариационной матрицы шума измерений повышает точность, устойчивость и помехозащищённость навигационной системы БПЛА в условиях ненадёжного сигнала GPS.

IV. Заключение

В статье изложены теоретические основы и разработан алгоритм адаптивного расширенного фильтра Калмана (AEKF), предназначенный для инерциальной навигационной системы БПЛА с интеграцией недорогих датчиков IMU/GNSS. Использование последовательности инновационных невязок для непрерывной оценки и корректировки ковариационной матрицы шума измерений в реальном времени позволяет преодолеть

ограничения традиционного EKF в условиях помех или ухудшения спутникового позиционирования. Анализ полученных результатов показывает, что AEKF ограничивает расходимость фильтра и позволяет уменьшить максимальное отклонение траектории до 30,44 % при ухудшении сигнала GPS в течение 60 секунд.

В дальнейших исследованиях планируется оптимизировать вычислительную нагрузку для реализации алгоритма AEKF в реальном времени непосредственно на высокопроизводительных встраиваемых микроконтроллерах, таких как STM32 и ESP32. Это позволит выполнять вычисления и формировать управляющие команды непосредственно на борту БПЛА, не полагаясь на автономную последующую обработку на компьютере. Кроме того, предполагается расширить интеграцию за счёт данных визуальных датчиков, таких как V-SLAM и оптический поток, чтобы усовершенствовать навигацию и обеспечить высокую надёжность при длительном ухудшении спутникового сигнала [2, 5].

Список литературы

1. Akhlaghi S., Zhou N., Huang Z. Adaptive Adjustment of Noise Covariance in Kalman Filter for Dynamic State Estimation // 2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting. – 2017. – P. 1–5. – DOI: 10.1109/PESGM.2017.8274312.
2. Brossard M., Barrau A., Bonnabel S. AI-IMU Dead-Reckoning // IEEE Transactions on Intelligent Vehicles. – 2020. – T. 5, № 4. – P. 585–595. – DOI: 10.1109/TIV.2020.2980758.
3. Groves P.D. Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems. 2nd ed. – Boston: Artech House, 2013. – 800 P.
4. Hide C., Moore T., Smith M. Adaptive Kalman Filtering for Low-cost INS/GPS // The Journal of Navigation. – 2003. – T. 56, № 1. – P. 143–152. – DOI: 10.1017/S0373463302002151.
5. Mur-Artal R., Montiel J.M.M., Tardós J.D. ORB-SLAM: A Versatile and Accurate Monocular SLAM System // IEEE Transactions on Robotics. – 2015. – T. 31, № 5. – P. 1147–1163. – DOI: 10.1109/TRO.2015.2463671.
6. Simon D. Optimal State Estimation: Kalman, H Infinity, and Nonlinear Approaches. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2006. – 552 P.
7. Titterton D.H., Weston J.L. Strapdown Inertial Navigation Technology. 2nd ed. – Stevenage: The Institution of Electrical Engineers, 2004. – 558 P.
8. Särkkä S. Bayesian Filtering and Smoothing. – Cambridge: Cambridge University Press, 2013. – 372 P.
9. Zhang J., Zhou W., Wang X. UAV Swarm Navigation Using Dynamic Adaptive Kalman Filter and Network Navigation. – Basel: MDPI, 2021. – 16 P.
10. Yang B., Yang E., Yu L., Niu C. Adaptive Extended Kalman Filter Based Fusion Approach for High Precision UAV Positioning in Extremely Confined Environments. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2023. Vol. 28, No. 1. C. 543–554.

ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ОТРАСЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Статья поступила в редакцию: 27.09.2026
Статья принята к публикации: 15.10.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 621.7+66.067

Исследование 3D-печатных фильтрующих элементов из PETG для очистки гидравлических рабочих жидкостей от механических загрязнений

Абдуазизов Набижон Азаматович
д-р техн. наук, проф.
Навоийский горно-технологический университет
Республика Узбекистан, г. Навои
E-mail: jurayevakbar@mail.ru
Турдиев Сардоржон Абдумуминович
PhD, доц.
Навоийский горно-технологический университет
Республика Узбекистан, г. Навои
Жураев Акбар Шавкатович
PhD, доц.
Навоийский горно-технологический университет
Республика Узбекистан, г. Навои
Нийетбаев Арисланбек Даулетбай ули
докторант
Навоийский горно-технологический университет
Республика Узбекистан, г. Навои

Study of 3D-printed PETG filter elements for removing mechanical contaminants from hydraulic working fluids

Abduazizov Nabijon Azamatovich
doctor of technical sciences
Prof, Navoi Mining and Technology University UZ
Republic of Uzbekistan, Navoi
Turdiev Sardorjon Abdumuminovich
PhD, Associate Professor
Navoi Mining and Technology University
Republic of Uzbekistan, Navoi city
Zhuraev Akbar Shavkatovich
PhD, Associate Professor
Navoi Mining and Technology University
Republic of Uzbekistan, Navoi

Библиографическое описание: Исследование 3D-печатных фильтрующих элементов из PETG для очистки гидравлических рабочих жидкостей от механических загрязнений // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Абдуазизов Н.А. [и др.]. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23571

Niyetbaev Aryslanbek Dauletbay ugli
Doctoral student
Navoi Mining and Technology University
Republic of Uzbekistan, Navoi

Аннотация

В статье исследована возможность применения фильтрующих элементов из полиэтилентерефталатгликоля (PETG), изготовленных методом аддитивного формирования, для очистки гидравлической рабочей жидкости от твердых механических загрязнений. Объектом исследования выбраны экспериментальные образцы №1 и №2, отличающиеся геометрией сформированной фильтрующей структуры и предназначенные для последовательного использования в составе ступенчатой системы очистки. Особое внимание уделено особенностям формирования проходных каналов в 3D-печатном материале и их функциональной роли при движении полидисперсной загрязненной жидкости.

Для экспериментальной оценки была подготовлена модельная загрязненная среда на основе гидравлического масла и измельченного кварцевого материала. Дисперсный состав загрязнений контролировался в диапазонах 1–2, 2–5, 5–10, 10–25, 25–50 и 50–100 мкм. Анализ результатов показал, что применение PETG-элементов в составе последовательного фильтрационного тракта сопровождается изменением распределения механических загрязнений по размерным фракциям. Установлено, что функциональное назначение 3D-печатного фильтрующего элемента определяется не только наблюдаемым размером поверхностных отверстий, но и пространственной геометрией проходных каналов, последовательностью расположения элементов и условиями переноса частиц потоком рабочей жидкости.

Максимальное снижение количества механических частиц составило 90,3 % для образца №1 в диапазоне 50–100 мкм и 81,8 % для образца №2 в диапазоне 10–25 мкм.

Полученные результаты подтверждают техническую возможность применения аддитивных технологий для формирования экспериментальных фильтрующих элементов с управляемой геометрией структуры и определяют направления дальнейшей адаптации их параметров к условиям очистки гидравлических рабочих жидкостей.

Abstract

The paper investigates the applicability of polyethylene terephthalate glycol (PETG) filter elements manufactured by additive fabrication for removing solid mechanical contaminants from hydraulic working fluids. Experimental samples No. 1 and No. 2 were selected as the objects of the study. The samples differ in the geometry of their manufactured filtration structures and are intended for sequential operation within a staged filtration system. Particular attention is paid to the geometry of flow passages formed in the 3D-printed material and their functional role in the transport of a polydisperse contaminated fluid.

A model contaminated medium consisting of hydraulic oil and crushed quartz material was prepared for experimental evaluation. Particle contamination was monitored within six size ranges: 1–2, 2–5, 5–10, 10–25, 25–50, and 50–100 μm. The experimental observations indicate that the use of PETG elements within a sequential filtration path is accompanied by changes in the particle-size

distribution of mechanical contaminants. The functional behavior of a 3D-printed filter element is determined not only by the apparent dimensions of its surface openings, but also by the spatial geometry of flow passages, the sequence of filter elements, and particle transport conditions within the working fluid.

The maximum reduction in particle count reached 90.3 % for sample No. 1 in the 50–100 μm range and 81.8 % for sample No. 2 in the 10–25 μm range.

The results obtained confirm the technical feasibility of applying additive technologies to form experimental filter elements with a controlled structure geometry and determine the directions for further adapting their parameters to hydraulic working fluid treatment conditions.

Ключевые слова: PETG, 3D-печать, фильтрующий элемент, гидравлическое масло, механические загрязнения, пористая структура, аддитивные технологии, фильтрация.

Keywords: PETG, 3D printing, filter element, hydraulic oil, mechanical contamination, porous structure, additive manufacturing, filtration.

Введение

Загрязнение гидравлических рабочих жидкостей твердыми частицами является одним из существенных факторов, влияющих на надежность и эксплуатационные характеристики гидравлических систем. Твердые загрязняющие частицы способны интенсифицировать изнашивание насосов, распределительной аппаратуры и других элементов гидропривода [9, 8]. Особое значение имеют концентрация и размерное распределение загрязнений, определяющие характер взаимодействия частиц с рабочими зазорами гидравлических компонентов [7–9].

Развитие технологий аддитивного производства расширяет возможности целенаправленного формирования фильтрующих структур. В отличие от традиционных пористых материалов, при 3D-печати возможно управлять геометрией проходных каналов, пространственным расположением элементов и общей архитектурой фильтрующей среды. В связи с этим исследование полимерных фильтрующих элементов представляет интерес не только с позиции материала изготовления, но и с позиции управляемого формирования структуры фильтрационного тракта [2–4].

Это обстоятельство принципиально важно для фильтрации. В пористой среде движение и задержание частиц определяются взаимодействием нескольких процессов. Наряду с непосредственным размерным ограничением прохода частицы существенное значение могут иметь изменение траектории потока, локальные сужения, последовательное осаждение и образование вторичных препятствий. Исследования засорения пористых сред подтверждают существенное влияние соотношения размеров частиц и пор, концентрации дисперсной фазы и структуры каналов на механизм закупоривания и изменение проницаемости фильтра. Исследования процессов фильтрации гидравлических жидкостей показывают, что перенос и задержание твердых частиц определяются совокупным влиянием размера частиц, структуры фильтрующей среды и гидродинамических условий [7, 1].

Следовательно, для 3D-печатного фильтра нельзя без экспериментального подтверждения отождествлять геометрический размер отверстия, наблюдаемого на поверхности образца, с его фактической тонкостью фильтрации. Фильтрующий элемент представляет собой пространственную систему каналов, а частица при прохождении через него взаимодействует не с одной условной плоскостью, а с последовательностью геометрических препятствий.

PETG представляет практический интерес для изготовления экспериментальных фильтрующих элементов благодаря технологичности экструзионной 3D-печати и возможности формирования изделий с заданной пространственной геометрией. В опубликованных исследованиях PETG применялся для изготовления функциональных элементов фильтрационных установок методом FDM [4]. Кроме того, экспериментальные исследования FDM-печатных образцов PETG показывают, что их эксплуатационные и структурно-механические характеристики зависят от внутренней архитектуры печати и условий контакта с жидкими эксплуатационными средами [10].

Однако сама возможность изготовления пористой детали еще не означает, что сформированная структура является эффективным фильтром для загрязненной гидравлической жидкости. Необходимо установить связь между конструктивно сформированной структурой PETG-элемента и его функциональным поведением в реальном потоке жидкости, содержащей полидисперсные твердые частицы.

Цель исследования

Экспериментально исследовать структурные особенности 3D-печатных PETG-фильтрующих элементов №1 и №2 и оценить возможность их применения в составе последовательной системы очистки гидравлической рабочей жидкости от механических загрязнений различной дисперсности.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. исследовать характер сформированной поверхности и проходных каналов образцов №1 и №2;

2. определить функциональное положение PETG-элементов в последовательном фильтрационном тракте;

3. исследовать изменение дисперсного состава загрязненной гидравлической жидкости при прохождении экспериментальной системы;

4. установить диапазоны размеров загрязнений, в которых применение сформированной системы сопровождается устойчивым снижением количества частиц;

5. определить направления дальнейшей оптимизации геометрии 3D-печатных фильтрующих элементов.

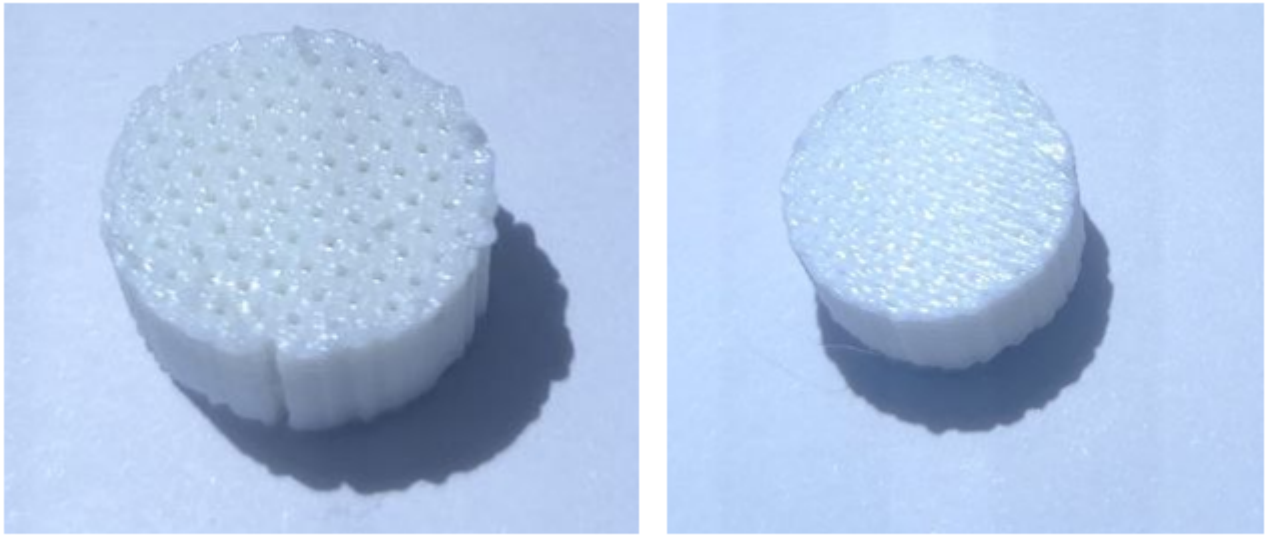
Материалы и методы исследования

Исследуемые фильтрующие элементы №1 и №2 изготавливали из PETG методом послойного экструзионного формирования. Для обеспечения воспроизводимости процесса изготовления контролировались основные технологические параметры 3D-печати: диаметр

сопла — 0.2 мм, высота слоя — 0.2 мм, температура экструдера — 247 °C, температура рабочего стола — 50 °C, скорость печати — 30 мм/с. Геометрические размеры изготовленных фильтрующих элементов составляли 34х25 мм.

Выбранные параметры печати сохранялись неизменными при изготовлении исследуемых образцов. Отличительные структурные особенности образцов №1 и №2 определялись заданной геометрией формируемых проходных участков.

Принципиальным отличием таких элементов от хаотически сформированной пористой среды является наличие заранее сформированной пространственной архитектуры проходных участков. При послойном построении взаимное расположение полимерных участков определяет геометрию открытых каналов, через которые проходит рабочая жидкость.



а) б)

Рисунок 1. Общий вид 3D-печатных фильтрующих элементов из PETG: а — образец №1; б — образец №2

Для исследования морфологических особенностей поверхности и геометрии проходных отверстий 3D-печатных фильтрующих элементов из PETG использовали цифровой микроскоп Digital Microscope X4. Микроскопическое наблюдение проводили для выявления особенностей послойного формирования структуры, характера расположения полимерных участков и конфигурации открытых каналов. Полученные изображения использовали для качественной оценки структуры исследуемых образцов.

При анализе учитывали, что наблюдаемые размеры поверхностных отверстий не характеризуют непосредственно минимальное проходное сечение каналов по всей толщине фильтрующего элемента. В связи с отсутствием подтвержденных метрологических данных калибровки количественную оценку размеров пор по микрофотографиям не проводили.

Микроскопические изображения показывают, что исследуемые PETG-образцы характеризуются упорядоченным расположением повторяющихся проходных участков, формируемых траекториями укладки материала. В отличие от случайно ориентированной поровой сети традиционных пористых материалов, наблюдаемая структура имеет выраженную геометрическую организацию.

При этом использование термина «размер поры» применительно к представленным изображениям требует определенной осторожности. Видимый размер входного отверстия характеризует только локальное сечение структуры. Реальная траектория жидкости определяется пространственным продолжением канала по толщине фильтрующего элемента.

Образец №1 располагался после первой ступени. Образец №2 использовался в завершающей части второй ступени.

Для экспериментальных исследований использовали 5 л гидравлического масла, в которое вводили 10 г измельченного кварцевого материала.

Объем рабочей жидкости и масса модельного загрязнителя во всех сопоставляемых опытах сохранялись постоянными. Объем 5 л использовался как фиксированный лабораторный объем модельной среды, а концентрация кварцевого загрязнителя 2 г/л — как единая исходная загрязняющая нагрузка.

Поэтому полученные результаты рассматриваются как сравнительные характеристики исследуемой экспериментальной системы при одинаковых начальных условиях и не экстраполируются непосредственно на полный объем промышленной гидросистемы.

Расчетная массовая концентрация введенного загрязнителя составляла:

$$C_z = \frac{m_z}{V} = \frac{10}{5} = 2 \text{ г/л}. \quad (1)$$

где:

m_z — масса введенного кварцевого загрязнителя, г;

V — объем гидравлической рабочей жидкости, л.

После введения загрязнителя рабочая жидкость перемешивалась, после чего использовалась для проведения экспериментальной фильтрации.

Важно отметить, что величина 2 г/л характеризует массу искусственно введенного материала, но не заменяет данные о количестве частиц. После диспергирования одна и та же масса кварцевого материала формирует большое число частиц различного размера, поэтому состояние загрязненной жидкости дополнительно оценивалось по ее фракционному составу.

Для исследования применялся экспериментальный стенд, обеспечивающий циркуляцию загрязненной гидравлической жидкости через последовательно установленные фильтрующие элементы.

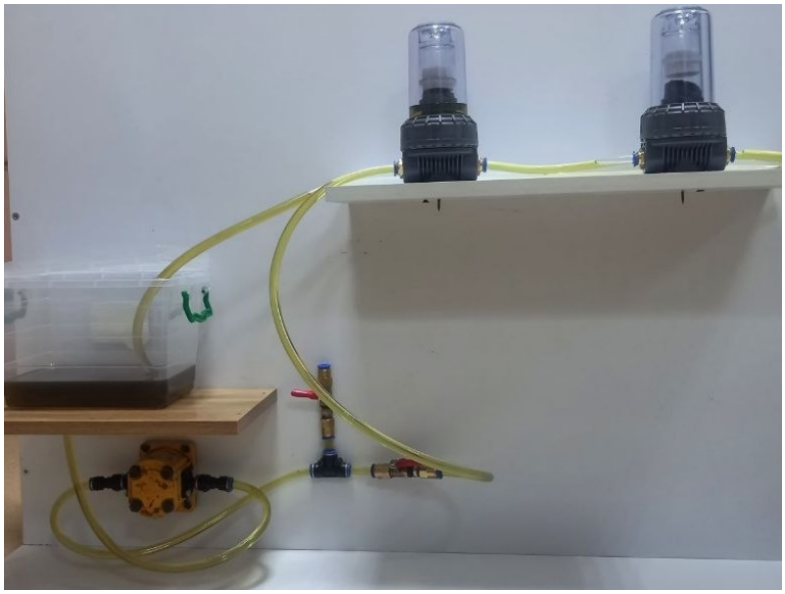


Рисунок 2. Экспериментальная установка для исследования последовательной фильтрации гидравлической рабочей жидкости с использованием 3D-печатных PETG-элементов

Экспериментальные исследования проводились на циркуляционной установке, обеспечивающей прохождение модельной загрязненной гидравлической рабочей жидкости через исследуемый фильтрационный тракт. Подача рабочей жидкости осуществлялась шестеренным гидравлическим насосом CASAPPA POLARIS серии PLP10 (Casappa S.p.A., Италия). В процессе испытаний загрязненная рабочая жидкость из резервуара подавалась насосом в фильтрационный контур, последовательно проходила через установленные фильтрующие элементы и возвращалась в систему. Продолжительность одного экспериментального цикла составляла 5 мин.

Для обеспечения воспроизводимости эксперимента режим работы циркуляционной установки во всех сопоставляемых опытах поддерживался неизменным. Согласно технической документации изготовителя, для исполнения насоса PLP10-2 рабочий объем составляет 2,13 $см^3$/об, максимальная частота вращения — 4000 $мин^{-1}$. При этом указанные значения являются паспортными характеристиками насоса и не рассматриваются как фактические рабочие параметры экспериментального стенда.

Объемный расход рабочей жидкости определяли экспериментально объемным методом по времени заполнения мерной емкости объемом 100 мл. После прохождения фильтрующего элемента первой ступени время заполнения составляло 7 с, что соответствует расходу Q=0,857 л/мин. После последовательного прохождения фильтрующих элементов первой и второй ступеней время заполнения той же емкости увеличивалось до 18 с, при этом расход составлял Q=0,333 л/мин. Таким образом, при подключении второй ступени фильтрации в условиях проведенного эксперимента наблюдалось снижение объемного расхода на 61,1 %.

Перепад давления на исследуемых фильтрующих элементах в рамках данной серии экспериментов отдельно не регистрировался. В связи с этим гидродинамическое влияние фильтрующих элементов оценивали по экспериментально определенному изменению объемного расхода рабочей жидкости. Полученные значения расхода характеризуют условия проведенного лабораторного эксперимента и не использовались для количественного

определения гидравлического сопротивления фильтрующих элементов. Определение перепада давления Δp на отдельных фильтрующих элементах и установление зависимости Δp=f(Q) предусмотрено в качестве отдельного этапа дальнейших исследований.

Для обеспечения сопоставимости результатов режим работы циркуляционной установки во всех экспериментальных сериях поддерживался неизменным.

Количество и размерное распределение механических частиц в исследуемой гидравлической рабочей жидкости определяли с использованием портативного анализатора загрязненности масла — счетчика частиц LUWATECH S41 (Shanghai LUWATECH Industrial Co., Ltd., Китай). Для оценки воспроизводимости результатов измерений использовали три последовательных показания анализатора LUWATECH S41 для каждой исследуемой пробы. На основании полученных значений определяли среднее арифметическое количество частиц и выборочное стандартное отклонение по каждому размерному диапазону.

Для каждой исследуемой пробы выполняли три последовательных измерения с использованием анализатора LUWATECH S41. Результаты представляли в виде среднего арифметического количества частиц по каждому размерному диапазону. Указанные измерения характеризуют повторяемость показаний прибора и не рассматриваются как независимые экспериментальные циклы фильтрации.

Контроль гранулометрического состава механических загрязнений гидравлической рабочей жидкости осуществляли с использованием портативного анализатора частиц LUWATECH S41 (Shanghai LUWATECH Industrial Co., Ltd., Китай), заводской № 23J201, работающего по принципу оптического затенения.

Согласно технической документации изготовителя, диапазон измеряемых размеров частиц составляет 0,8–100 мкм, а количество измерительных каналов — 16. Прибор изготовлен в декабре 2023 г. и прошёл заводскую калибровку 23 декабря 2023 г., что подтверждается сертификатом Factory Calibration Certificate, выданным предприятием-изготовителем. Результат калибровки указан как «Conformity» (соответствует установленным требованиям).

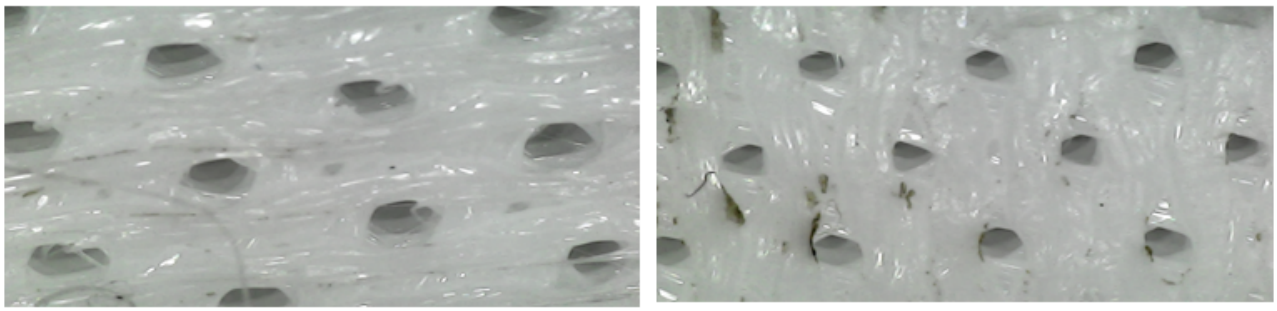
В сопроводительном сертификате качества изготовителя приведена ссылка на ISO 11171:2016. Определение количества механических частиц проводили с распределением по размерным диапазонам 1–2, 2–5, 5–10, 10–25, 25–50 и 50–100 мкм в соответствии с выбранным режимом классификации ГОСТ 17216. Для каждой исследуемой пробы выполняли три последовательных измерения, результаты которых представляли в виде среднего количества частиц на 100 мл рабочей жидкости. Для стандартизированного кодирования уровня загрязненности гидравлических жидкостей твердыми частицами также применяется международный стандарт ISO 4406:2021 [5].

Результаты и обсуждение

Микроскопическое исследование, выполненное с использованием цифрового микроскопа Digital Microscope X4, позволило выявить особенности поверхностной структуры изготовленных PETG-элементов №1 и №2. Установлено наличие геометрически организованных проходных участков, формируемых в результате последовательного нанесения полимерного материала.

Наблюдаемая структура характеризуется пространственным расположением полимерных участков, между которыми формируются каналы для прохождения рабочей жидкости. При этом видимая геометрия поверхностных отверстий отражает только локальные особенности структуры и не позволяет непосредственно определить фактическую тонкость фильтрации.

Таким образом, микроскопические наблюдения подтверждают возможность формирования организованной структуры методом 3D-печати, однако оценка ее фильтрационных характеристик требует сопоставления с результатами экспериментального определения количества и размерного распределения задерживаемых механических частиц.



а) б)

Рисунок 3. Микроструктура проходных участков 3D-печатных PETG-фильтрующих элементов: а — образец №1; б — образец №2

Экспериментальные результаты представлены в виде средних значений количества механических частиц, полученных по трем последовательным измерениям каждой пробы. Для характеристики разброса показаний анализатора предусмотрено определение выборочного стандартного отклонения отдельно по каждому диапазону размеров частиц.

Сопоставление результатов фильтрации проводили по относительному изменению количества частиц по отношению к исходному уровню загрязнения. Поскольку последовательные измерения одной пробы не являются независимыми повторениями полного экспериментального цикла, статистическая значимость различий между конфигурациями №1 и №2 на основании имеющихся данных не устанавливалась.

Полученные значения эффективности следует рассматривать как экспериментальные оценки, характеризующие исследуемые конфигурации при реализованных условиях испытаний. Количественные результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1. Изменение количества механических частиц в экспериментальной системе, включающей 3D-печатные PETG-элементы №1 и №2

Размер частиц, мкм	**До фильтрации, частиц/100 мл**	**После фильтрации №1, частиц/ 100 мл**	**Снижение №1, %**	**После фильтрации №2, частиц/ 100 мл**	**Снижение №2, %**
1–2	64 891	24 087	**62,9**	22 370	**65,5**
2–5	120 346	40 562	**66,3**	35 342	**70,6**
5–10	83 145	20 085	**75,8**	20 078	**75,9**
10–25	59 204	8 103	**86,3**	10 763	**81,8**
25–50	16 428	1 763	**89,3**	3 465	**78,9**
50–100	4 003	388	**90,3**	1 914	**52,2**

Представленные в таблице 1 результаты характеризуют изменение количества механических частиц в исследованных экспериментальных конфигурациях. При интерпретации полученных данных необходимо учитывать положение фильтрующих элементов в системе, исходное состояние загрязненной рабочей жидкости и условия проведения отдельных измерений.

Поэтому различия между зарегистрированными значениями не следует однозначно связывать исключительно с геометрией PETG-элементов. Для установления самостоятельного влияния структуры каждого образца необходимы дополнительные сравнительные испытания при одинаковых гидродинамических условиях и исходной загрязненности рабочей жидкости.При использовании образца №2 в диапазоне 1–2 мкм количество частиц снизилось на 65,5 %, а для частиц размером 2–5 мкм снижение составило 70,6 %. В диапазоне 5–10 мкм количество частиц уменьшилось на 75,9 %. Для частиц размером 10–25 мкм зарегистрировано максимальное снижение — 81,8 %. В диапазоне 25–50 мкм снижение составило 78,9 %. Для наиболее крупной исследованной фракции 50–100 мкм эффективность снижения количества частиц уменьшилась до 52,2 %. Таким образом, для образца №2 зависимость результата очистки от размера частиц имеет немонотонный характер: после достижения максимального значения в диапазоне 10–25 мкм наблюдается снижение показателя для более крупных фракций.

Для образца №1 количество частиц размером 1–2 мкм снизилось на 62,9 %, а в диапазоне 2–5 мкм — на 66,3 %. Для частиц размером 5–10 мкм снижение составило 75,8 %. При дальнейшем увеличении размера частиц эффективность очистки возрастала: в диапазоне 10–25 мкм количество частиц уменьшилось на 86,3 %, в диапазоне 25–50 мкм — на 89,3 %, а максимальное снижение 90,3 % зарегистрировано для частиц размером 50–100 мкм.

Сопоставление результатов показывает различный характер фракционной избирательности исследуемых PETG-элементов. Образец №2 показал несколько более высокое снижение количества мелкодисперсных частиц размером 1–5 мкм, тогда как для фракции 5–10 мкм результаты двух образцов практически совпадали и составили 75,9 и 75,8 % соответственно. Начиная с диапазона 10–25 мкм более выраженное снижение количества частиц наблюдалось для образца №1. Наиболее существенное различие между образцами зарегистрировано для фракции 50–100 мкм: 90,3 % для образца №1 против 52,2 % для образца №2.

Полученные результаты свидетельствуют о различной фракционной избирательности исследованных фильтрационных конфигураций. Для образца №1 максимальное снижение количества частиц составило 90,3 % в диапазоне 50–100 мкм, а для образца №2 — 81,8 % в диапазоне 10–25 мкм. Наблюдаемые различия могут быть связаны с особенностями структуры фильтрующих элементов и условиями проведения эксперимента.

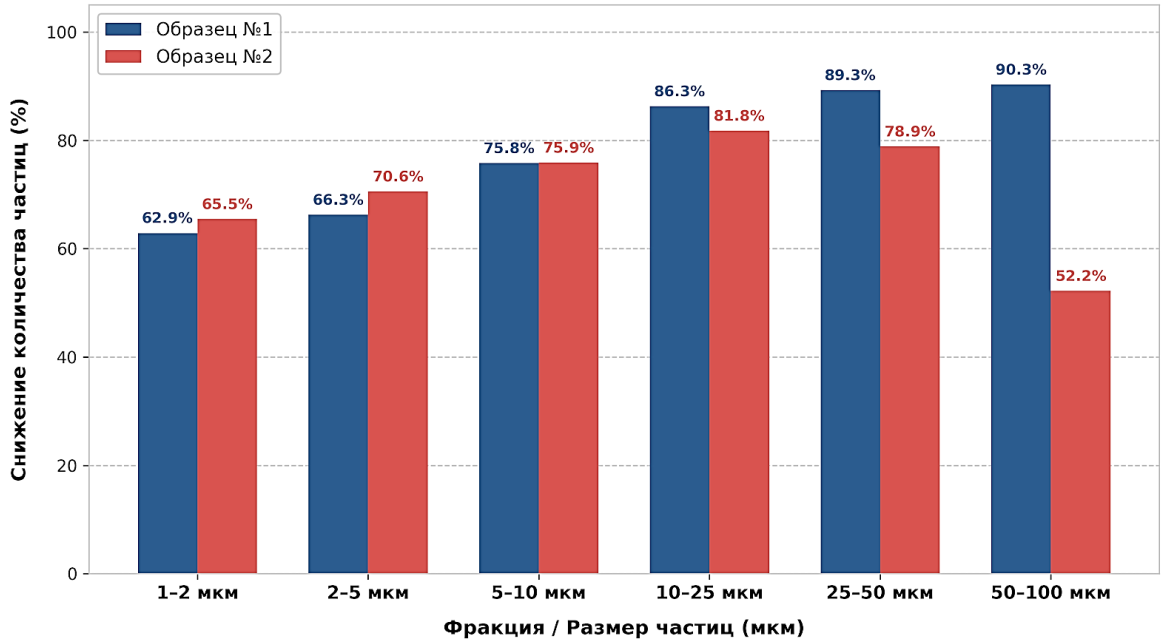


Рисунок 4. Изменение эффективности удаления механических загрязнений в зависимости от размера частиц

Характер полученных зависимостей свидетельствует о различной фракционной избирательности исследуемых 3D-печатных PETG-элементов. Для образца №2 эффективность снижения количества частиц возрастала от 65,5 % в диапазоне 1–2 мкм до максимального значения 81,8 % для фракции 10–25 мкм. При дальнейшем увеличении размера частиц наблюдалось снижение данного показателя: до 78,9 % в диапазоне 25–50 мкм и до 52,2 % для частиц размером 50–100 мкм. Таким образом, зависимость для образца №2 имеет выраженный немонотонный характер, а максимальная эффективность соответствует промежуточному диапазону размеров частиц.

Для образца №1 установлена иная закономерность. В исследованном диапазоне эффективность снижения количества частиц в целом возрастала с увеличением их размера: от 62,9 % для фракции 1–2 мкм и 66,3 % для 2–5 мкм до 75,8 % в диапазоне 5–10 мкм. Для более крупных частиц эффективность составила 86,3 % в диапазоне 10–25 мкм, 89,3 % — для 25–50 мкм и достигла максимального значения 90,3 % для фракции 50–100 мкм.

Следовательно, полученные экспериментальные зависимости нельзя описать единым упрощенным положением «чем крупнее частица, тем выше эффективность фильтрации». Такая тенденция в большей степени проявляется для образца №1, тогда как для образца №2 после достижения максимума в диапазоне 10–25 мкм эффективность снижается, особенно для фракции 50–100 мкм. Различие характера зависимостей указывает на влияние структурной организации 3D-печатных PETG-элементов на взаимодействие с полидисперсным потоком механических загрязнений.

В отличие от традиционного сетчатого фильтра, для которого размер проходного отверстия является одним из основных параметров задержания частиц, применительно к объемным 3D-печатным элементам такой подход является недостаточным. Процесс фильтрации определяется не только характерным размером входных отверстий, но и пространственной геометрией каналов, их протяженностью, изменением направления потока и последовательным взаимодействием частиц с внутренней структурой

фильтрующего элемента. Поэтому наблюдаемая фракционная избирательность должна рассматриваться как результат совокупного влияния геометрических и гидродинамических факторов. Подобный подход согласуется с результатами исследований фильтрации гидравлических жидкостей, показывающими влияние размера частиц, структуры фильтрующей среды и условий движения жидкости на процессы переноса и задержания загрязнений [7, 1].

Следует отметить, что прямое экспериментальное сравнение исследуемых PETG-элементов с серийными гидравлическими фильтрами в рамках настоящей работы не проводилось. В связи с этим полученные значения характеризуют исследуемые экспериментальные образцы и не рассматриваются как доказательство их превосходства над промышленными фильтрующими элементами. Сравнительные испытания PETG-элементов и серийных гидравлических фильтров при одинаковых исходной загрязненности рабочей жидкости, расходе и перепаде давления являются отдельным направлением дальнейших исследований. При проведении дальнейших исследований целесообразно учитывать требования стандарта ISO 16889:2022, регламентирующего многопроходный метод оценки фильтрационных характеристик фильтрующих элементов [6].

Заключение

Проведенные исследования показали возможность применения изготовленных методом послойной 3D-печати PETG-элементов в экспериментальной системе очистки гидравлической рабочей жидкости от механических загрязнений. Установлено, что исследуемые фильтрующие конфигурации характеризуются различной фракционной избирательностью. Максимальное снижение количества частиц для образца №1 составило 90,3 % в диапазоне 50–100 мкм, а для образца №2 — 81,8 % в диапазоне 10–25 мкм. Полученные зависимости свидетельствуют о необходимости учитывать не только геометрию проходных отверстий, но и пространственную структуру фильтрующего тракта, а также условия движения загрязненной рабочей жидкости. Результаты лабораторных испытаний подтверждают перспективность дальнейшего исследования PETG-элементов как компонентов фильтрационных систем. Для обоснования их практического применения необходимо проведение независимых повторных испытаний, определение перепада давления, оценка ресурса и сравнительные исследования с серийными гидравлическими фильтрами.

Список литературы

1. Chen J., Xi D., Wang G., Zhou M., Hu Y., Xie X. Numerical Investigation into Particle Migration Characteristics in Hydraulic Oil Filtration // Processes. – 2025. – T. 13, № 5. – Art. 1289. – DOI: 10.3390/pr13051289.
2. Clark M.J., Garg T., Rankin K.E., Bradshaw D., Nightingale A.M. 3D printed filtration and separation devices with integrated membranes and no post-printing assembly // Reaction Chemistry & Engineering. – 2024. – T. 9. – P. 251–259. – DOI: 10.1039/D3RE00245D.

3. Clark M.J. et al. Scalable 3D printing method for the manufacture of single-material fluidic devices with integrated filter for point of collection colourimetric analysis // Analytica Chimica Acta. – 2021. – T. 1151. – Art. 238101. – DOI: 10.1016/j.aca.2020.11.033.
4. Gáspár I., Neczpál R. Testing of 3D Printed Turbulence Promoters for Membrane Filtration // Periodica Polytechnica Chemical Engineering. – 2020. – T. 64, № 3. – P. 371–376. – DOI: 10.3311/PPch.15211.
5. ISO 4406:2021. Hydraulic fluid power – Fluids – Method for coding the level of contamination by solid particles. – Geneva: International Organization for Standardization [Электронный ресурс]. – 6 P. URL: https://www.iso.org/standard/79716.html (дата обращения: 19.10.2026).
6. ISO 16889:2022. Hydraulic fluid power – Filters – Multi-pass method for evaluating filtration performance of a filter element. – Geneva: International Organization for Standardization [Электронный ресурс]. – 43 P. URL: https://www.iso.org/standard/77245.html (дата обращения: 19.10.2026).
7. Klarecki K., Rabsztyn D. Experimental Verification of the Filtration Phenomena in Hydraulic Systems // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2019. – T. 934. – P. 220–230. – DOI: 10.1007/978-3-030-15857-6_22.
8. Ng F., Harding J.A., Glass J. Improving hydraulic excavator performance through in line hydraulic oil contamination monitoring // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2017. – T. 83. – P. 176–193. – DOI: 10.1016/j.ymssp.2016.06.006.
9. Novak N., Trajkovski A., Kalin M. Majdič F. Degradation of Hydraulic System due to Wear Particles or Medium Test Dust // Applied Sciences. – 2023. – T. 13, № 13. – Art. 7777. – DOI: 10.3390/app13137777.
10. Rihar L. Hozdić E. Mechanical and Microstructural Response of FDM-Printed PETG and PETG+CF to Variable Infill Architecture and Lubricant Exposure // Polymers. – 2026. – T. 18, № 5. – Art. 654. – DOI: 10.3390/polym18050654.

ПРОМЫШЛЕННОСТЬ И ПРОИЗВОДСТВО

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ХИМИЧЕСКАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

Статья поступила в редакцию: 29.09.2026
Статья принята к публикации: 12.10.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 66.074.51:621.928

DOI: 10.32743/UniTech.2026.151.10.23538

Экспериментальное исследование распределения скорости газа в рабочих зонах роторно-фильтрующего аппарата

Исомидинов Азизжон Саломидинович
д-р философии (PhD) по техническим наукам, доц.
кафедра технологических машин и оборудования, Ферганский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Фергана
E-mail: azizjon.isomidinov@fstu.uz

Experimental study of gas velocity distribution in the operating zones of a rotary filter apparatus

Isomidinov Azizjon Salomidinovich
doctor of Philosophy (PhD) in Technical Sciences, Associate Professor
Department of Technological Machines and Equipment Fergana State Technical University
Republic of Uzbekistan, Fergana

Аннотация

В работе экспериментально исследовано распределение скорости газового потока в характерных рабочих зонах роторно-фильтрующего аппарата, предназначенного для мокрой очистки мелкодисперсных запыленных газов химических производств. Цель исследования заключалась в установлении влияния активной площади фильтрующей поверхности на изменение локальной скорости газа и аэродинамический режим аппарата. Скорость измеряли во входной части, в диффузоре, в щелевом зазоре между ротором и корпусом, на участке между входным и выходным патрубками, в конфузоре и выходной зоне с использованием электронного анемометра BA06-TROTEC. Эксперимент выполнен при трёх значениях

Библиографическое описание: Исомидинов А.С. Экспериментальное исследование распределения скорости газа в рабочих зонах роторно-фильтрующего аппарата // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23538

активной площади фильтрующей поверхности: 0,202; 0,229 и 0,268 м², а также при пяти уровнях входной скорости газа. Для обработки результатов определяли коэффициент сохранения скорости, относительное снижение скорости и параметры линейных регрессионных зависимостей между входной и локальной скоростью газа. Установлено, что увеличение активной площади сопровождается последовательным снижением скорости на рабочих поверхностях и в выходной зоне. Наиболее выраженное торможение потока выявлено на поверхности В, в конфузоре и на выходе из аппарата. При активной площади 0,268 м² среднее снижение скорости в выходной зоне достигло 82,3 %. Полученные зависимости могут быть использованы при выборе активной площади фильтра и обосновании рационального соотношения между продолжительностью контакта газового потока с увлажненной поверхностью, гидравлическим сопротивлением и предполагаемой эффективностью очистки.

Abstract

This study experimentally investigates gas-velocity distribution in the characteristic operating zones of a rotary filter apparatus designed for wet cleaning of fine dust-laden gases generated in chemical processes. The aim was to determine how the active area of the filtering surface affects local gas velocity and the aerodynamic regime of the apparatus. Gas velocity was measured at the inlet, in the diffuser, in the slit gap between the rotor and housing, in the section between the inlet and outlet nozzles, in the converging section, and at the outlet using a BA06-TROTEC electronic anemometer. The experiments were performed at three active filtering-surface areas of 0.202, 0.229, and 0.268 m² and at five inlet gas-velocity levels. The data were processed by calculating the velocity-retention coefficient, relative velocity reduction, and parameters of linear regression relationships between inlet and local gas velocities. Increasing the active filtering area resulted in a progressive decrease in gas velocity at the working surfaces and in the outlet zone. The strongest deceleration was observed at working surface B, in the converging section, and at the apparatus outlet. At an active area of 0.268 m², the mean velocity reduction in the outlet zone reached 82.3 %. The obtained relationships can be used to select a rational active filter area and to substantiate the balance between gas-contact time with the wetted surface, hydraulic resistance, and the expected cleaning performance.

Ключевые слова: роторно-фильтрующий аппарат, запыленный газ, мокрая газоочистка, распределение скорости газа, активная фильтрующая поверхность, гидравлическое сопротивление, аэродинамический режим.

Keywords: rotary filter apparatus, dust-laden gas, wet gas cleaning, gas velocity distribution, active filtering surface, hydraulic resistance, aerodynamic regime.

Введение

Эффективная очистка запыленных газов промышленных предприятий является одной из важнейших задач охраны атмосферного воздуха, снижения технологических выбросов и обеспечения безопасных условий труда на производственных площадках. Особенно актуальна эта проблема для предприятий по производству минеральных удобрений. На линиях производства суперфосфата и аммофоса из барабанных сушильно-грануляционных

аппаратов, реакторов-смесителей, элеваторов, дробилок и грохотов выделяются газопылевые смеси, содержащие мелкодисперсные частицы, а в отдельных случаях — кислые газовые газовые компоненты. Очистка таких потоков в обычных инерционных аппаратах или одноступенчатых скрубберах не всегда обеспечивает устойчиво высокую эффективность [7, 10, 13].

В исследованиях роторно-фильтрующий аппарат рассматривался как средство очистки пыли минеральных удобрений и вторичных газов, выбрасываемых в атмосферу цехом АС-72М АО «Farg‘onaazot» и цехом производства аммофоса АО «AMMAFOS-MAXAM». Основная задача аппарата состоит в обеспечении высокой эффективности очистки при относительно небольшом гидравлическом сопротивлении, интенсификации контакта «газ-жидкость-фильтр» и снижении энергозатрат [4].

Преимущество роторно-фильтрующего аппарата заключается в том, что запыленный газовый поток одновременно контактирует с каплями жидкости, увлажненной фильтрующей поверхностью и подвижными рабочими органами. В результате частицы отделяются за счёт совокупного действия инерционных и центробежных сил, смачивания, коагуляции и улавливания на фильтрующей поверхности. Однако устойчивость процесса непосредственно зависит от распределения скорости газа внутри аппарата, характера перенаправления потока в диффузоре и конфузоре, а также от активной площади фильтрующей поверхности [5, 7, 10, 11].

В связи с этим основное внимание в настоящем исследовании уделено экспериментальному определению распределения скорости газа в рабочих зонах роторно-фильтрующего аппарата. Цель работы заключалась в установлении закономерностей перераспределения газового потока при увеличении $S_{акт}$, оценке снижения скорости в щелевом зазоре между ротором и корпусом, на участке между входным и выходным патрубками, в конфузоре и выходной части, а также в разработке аэродинамического обоснования выбора активной площади фильтра.

В рабочей зоне аппарата активную площадь фильтрующей поверхности в ходе эксперимента изменяли при $S_{акт}$ = 0,202; 0,229 и 0,268 м². Увеличение активной площади изменяет траекторию и скорость газового потока в контактной зоне. В настоящем исследовании влияние данного параметра оценивали по распределению локальной скорости газа. Эффективность очистки и гидравлическое сопротивление рассматриваются как параметры, требующие отдельного экспериментального определения.

Материалы и методы

Объект исследования и конструктивное описание аппарата

Объектом исследования служила лабораторная модель роторно-фильтрующего аппарата, предназначенного для мокрой очистки запыленных газов. В состав установки входят вентилятор подачи запыленного газового потока, газонаправляющие каналы, рабочая камера, диффузор, роторный рабочий орган с фильтрующей поверхностью, щелевой зазор между ротором и корпусом, участок между входным и выходным патрубками, каналы подачи продувочного газа, конфузор, насос подачи жидкости, ротаметр, жидкостные трубопроводы и блок управления. После поступления в рабочую камеру газовый поток расширяется

в диффузоре, проходит через фильтрующую поверхность и увлажненную контактную среду, после чего направляется через конфузор к выходу из аппарата. На рис. 1 представлена лабораторная модель роторно-фильтрующего аппарата.



Рисунок 1. Общий вид лабораторной установки роторно-фильтрующего аппарата

В экспериментальных исследованиях скорость газового потока измеряли в шести характерных зонах аппарата: во входной части, в диффузоре, в щелевом зазоре между ротором и корпусом, на участке между входным и выходным патрубками, в конфузоре и на выходе из аппарата. Такое расположение точек измерения позволило оценить последовательное перераспределение потока от входа до выхода.

Скорость газа изменяли путем регулирования степени открытия шибера вентилятора. В зависимости от положения шибера входную скорость принимали равной $\upsilon_{вх}$ = 34,4; 28,0; 23,8; 18,79 и 7,67 м/с. Эти значения охватывают высокий, средний и низкий режимы работы. Для каждого режима при трёх значениях $S_{акт}$ регистрировали скорости в диффузоре, на рабочих поверхностях, в конфузоре и выходной части.

Скорость газового потока определяли электронным анемометром BA06-TROTEC. Контроль давления и температуры осуществляли с учетом подходов, рекомендуемых для аэродинамических испытаний: ГОСТ 17.2.4.06 – 90 — для определения скорости и расхода газопылевых потоков, отходящих от стационарных источников загрязнения; ГОСТ 17.2.4.07-90 — для определения давления и температуры газовых потоков; ГОСТ 12.3.018-79 — для организации аэродинамических испытаний вентиляционных систем [1, 2, 3].

Эксперимент проводили в следующей последовательности. Сначала установку запускали и выводили на устойчивый режим. Затем положением шибера задавали входную скорость газа. После этого анемометром BA06-TROTEC фиксировали значения скорости в каждой зоне; эксперимент повторяли при трёх значениях $S_{акт}$. Полученные данные заносили в таблицу, после чего рассчитывали коэффициент сохранения скорости, относительное снижение скорости и регрессионные зависимости. Полученные данные заносили в таблицу. Среднюю скорость газа, коэффициент сохранения скорости и относительное снижение скорости рассчитывали по формулам (1)–(3), а параметры линейной регрессии — по формуле (5).

Расчётные зависимости

При обработке экспериментальных данных определяли среднюю скорость газа, коэффициент сохранения скорости по зонам и относительное снижение скорости по следующим выражениям:

$$\bar{\upsilon}_{\text{ср}} = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\upsilon_i \quad (1)$$

$$K_{\text{з}} = \frac{\upsilon_{\text{з}}}{\upsilon_{\text{вх}}} \quad (2)$$

$$\delta_{\text{з}} = \frac{\upsilon_{\text{вх}} - \upsilon_{\text{з}}}{\upsilon_{\text{вх}}} \cdot 100\% \quad (3)$$

$$\Delta P = \zeta\frac{\rho_{\text{г}}\upsilon^2}{2} \quad (4)$$

$$\upsilon_{\text{з}} = a\upsilon_{\text{вх}} + b \quad (5)$$

где $\upsilon_{\text{з}}$ - скорость газа в рассматриваемой зоне, м/с; $\upsilon_{\text{вх}}$ - скорость газа на входе в аппарат, м/с; $K_{\text{з}}$ - коэффициент сохранения скорости по зоне; $\delta_{\text{з}}$ - относительное снижение скорости, %; ΔP - гидравлическое сопротивление, Па; ζ - коэффициент местного или общего сопротивления; $\rho_{\text{г}}$ - плотность газа, кг/м³; a и b – коэффициенты регрессии, определяемые по экспериментальным данным.

Результаты и обсуждение

Экспериментальные результаты показали, что с увеличением Sакт скорость газового потока в щелевом зазоре между ротором и корпусом, на участке между входным и выходным патрубками и в выходной зоне снижается более интенсивно. Так, при высоком режиме $\upsilon_{\text{вх}}$ = 34,4 м/с и $S_{\text{акт}}$ = 0,202 м² скорость газа в щелевом зазоре между ротором и корпусом составляла 25,4 м/с, на участке между входным и выходным патрубками — 18,5 м/с, а на выходе — 17,4 м/с. При увеличении $S_{\text{акт}}$ до 0,268 м² в том же режиме скорость в щелевом зазоре между ротором и корпусом уменьшалась до 20,0 м/с, на участке между входным и выходным патрубками — до 9,1 м/с, а на выходе — до 8,5 м/с. На рис. 2 показано изменение скорости газа в рабочих зонах роторно-фильтрующего аппарата в зависимости от активной площади фильтрующей поверхности.

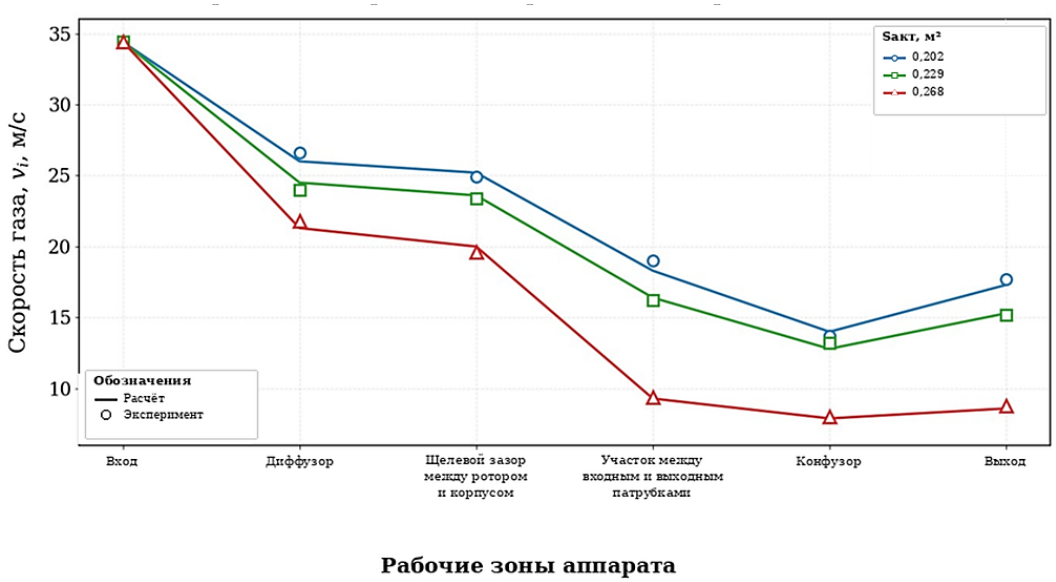


Рисунок 2. Распределение скорости газа по рабочим зонам в режиме высокой входной скорости

Как видно из рис. 2, по мере увеличения площади фильтрующей поверхности скорость потока после входной части последовательно уменьшается. Наиболее интенсивное снижение скорости наблюдается на рабочей поверхности В и в зоне конфузора. Это указывает на более выраженное торможение потока в данных участках аппарата.

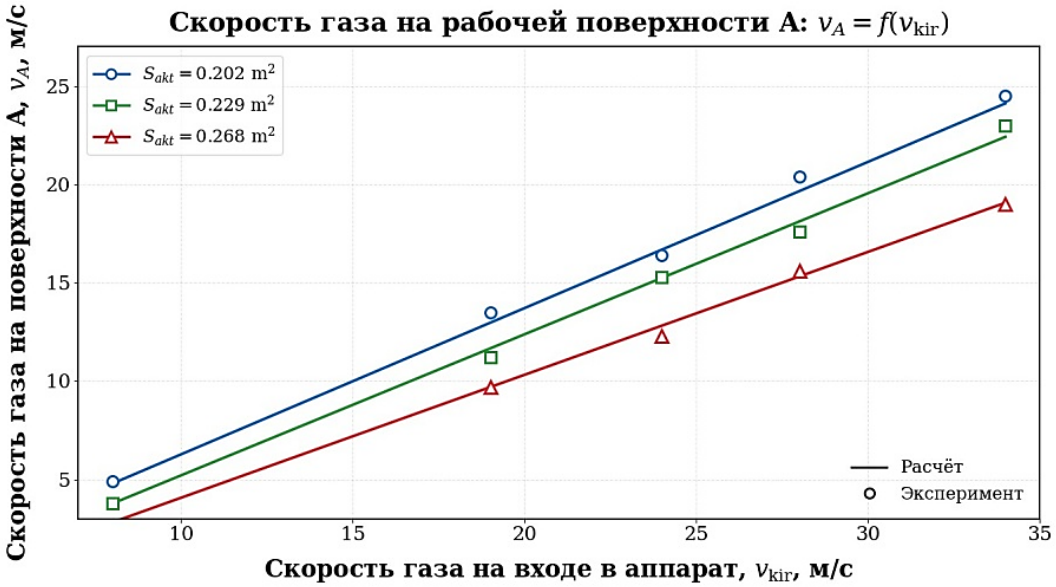


Рисунок 3. Зависимость скорости газа на рабочей поверхности А от входной скорости

Как показано на рис. 3, скорость газа на рабочей поверхности А изменяется почти линейно относительно входной скорости. В щелевом зазоре между ротором и корпусом скорость газа изменяется почти линейно относительно входной скорости. При $S_{акт}$ = 0,202 м² скорость газа в этом зазоре в среднем составляет около 0,79 от $\upsilon_{вх}$, тогда как при $S_{акт}$ = 0,268 м² этот коэффициент уменьшается примерно до 0,59. Следовательно, увеличение активной площади фильтрующей поверхности способствует замедлению газового потока в этой зоне (2).

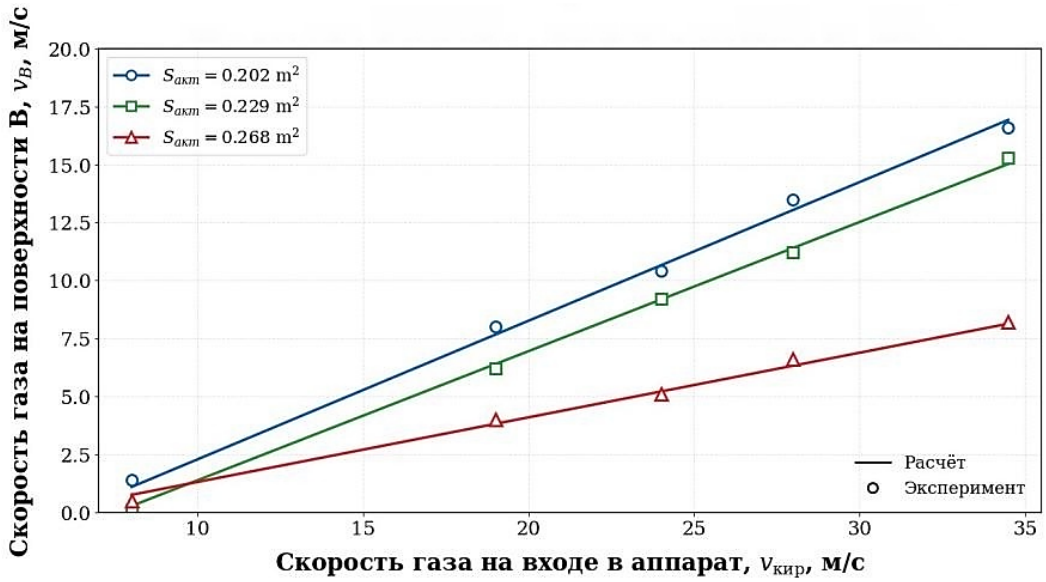


Рисунок 4. Зависимость скорости газа на участке между входным и выходным патрубками от входной скорости

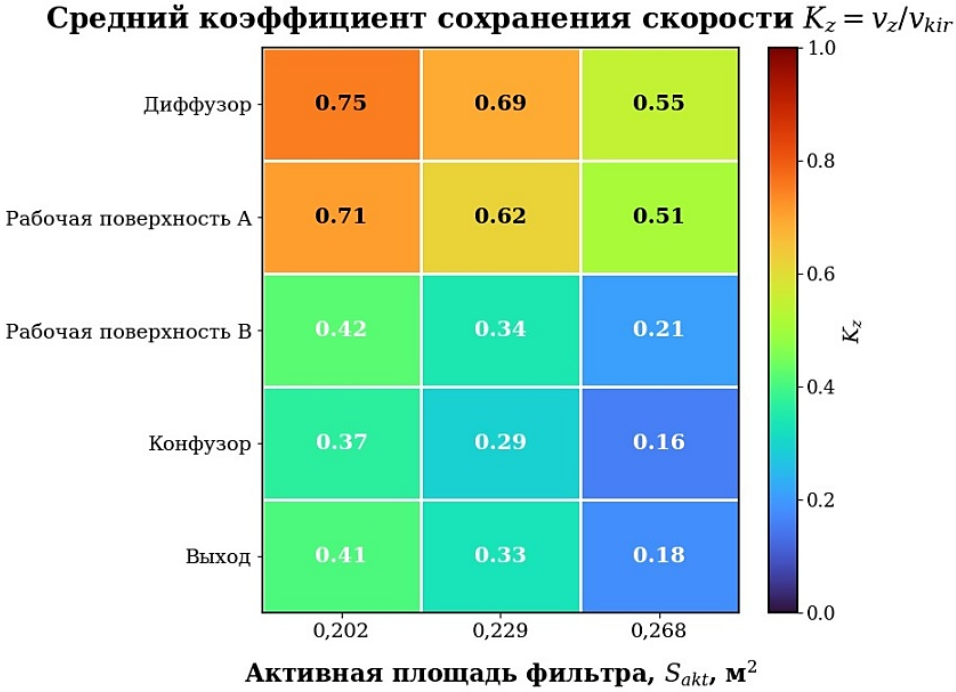


Рисунок 5. Тепловая карта среднего коэффициента сохранения скорости при различных значениях $S_{акт}$

На рис. 4 показано, что при Sакт = 0,268 м² и высокой входной скорости скорость газа на участке между входным и выходным патрубками снизилась до 9,1 м/с, что ниже, чем в щелевом зазоре между ротором и корпусом. Средний коэффициент сохранения скорости при различных значениях активной площади представлен на тепловой карте (рис. 5).

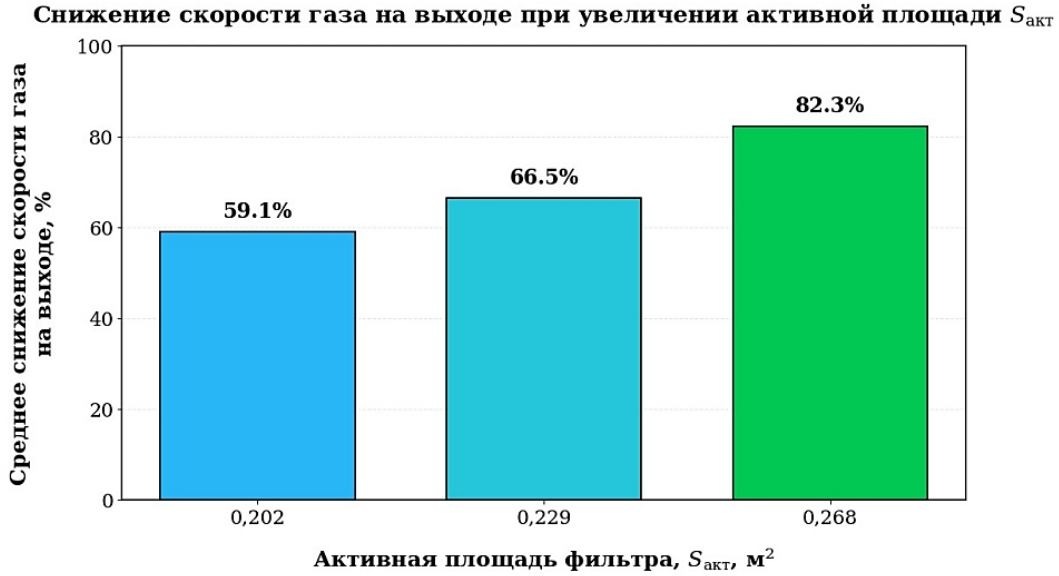


Рисунок 6. Снижение скорости газа в выходной зоне при увеличении активной площади фильтра

На рис. 6 показано, что среднее относительное снижение скорости газа в выходной зоне, рассчитанное по формуле (3), составило 59,1 % при $S_{акт} = 0,202$ м^2, 66,5 % при $S_{акт} = 0,229$ м^2 и 82,3 % при $S_{акт} = 0,268$ м^2. Увеличение активной площади сопровождается более интенсивным снижением скорости потока в рабочих зонах аппарата. Это может способствовать увеличению расчётного времени контакта газовой фазы с увлажнённой поверхностью.

Для количественной оценки влияния входной скорости на локальную скорость газа выполнен линейный регрессионный анализ. Использована зависимость $v_з = a\,v_{вх} + b$. Полученные уравнения, коэффициенты детерминации R^2 и коэффициенты линейной корреляции r представлены в табл. 1. Для положительных коэффициентов наклона принималось $r = +\sqrt{R^2}$.

Таблица 1. Результаты линейного регрессионного анализа скорости газа

$S_{акт}$, м^2	Зона	Уравнение регрессии	R^2	r
0,202	Рабочая поверхность А	$v_з = 0,742\,v_{вх} - 0,753$	0,9775	0,9887
0,202	Рабочая поверхность В	$v_з = 0,577\,v_{вх} - 2,998$	0,9159	0,9570
0,202	Выход	$v_з = 0,547\,v_{вх} - 2,730$	0,9201	0,9592
0,229	Рабочая поверхность А	$v_з = 0,699\,v_{вх} - 1,588$	0,9416	0,9704
0,229	Рабочая поверхность В	$v_з = 0,548\,v_{вх} - 3,974$	0,8996	0,9485
0,229	Выход	$v_з = 0,535\,v_{вх} - 3,797$	0,9007	0,9491
0,268	Рабочая поверхность А	$v_з = 0,625\,v_{вх} - 2,197$	0,9447	0,9720
0,268	Рабочая поверхность В	$v_з = 0,287\,v_{вх} - 1,537$	0,9415	0,9703
0,268	Выход	$v_з = 0,292\,v_{вх} - 2,145$	0,9361	0,9675

Как видно из табл. 1, значения R^2 находятся в диапазоне 0,8996 – 0,9775, а коэффициенты r – в диапазоне 0,9485 – 0,9887, что свидетельствует о высокой тесноте линейной связи между входной и локальной скоростями газа. При увеличении $S_{акт}$ от 0,202

до 0,268 м² коэффициент наклона на рабочей поверхности В уменьшается с 0,577 до 0,287, а в выходной зоне – с 0,547 до 0,292. На рабочей поверхности А изменение менее выражено: с 0,742 до 0,625. Это количественно подтверждает усиление торможения газового потока по мере увеличения активной площади фильтра.

Полученные в табл. 1 регрессионные зависимости дополняют графические результаты и позволяют количественно оценивать изменение локальной скорости газа при варьировании активной площади фильтра в пределах исследованного диапазона входных скоростей.

Полученные результаты показали, что газовый поток внутри роторно-фильтрующего аппарата проходит неравномерно, а последовательно перераспределяется по рабочим зонам. В диффузоре поток расширяется, и его скорость первоначально снижается. В щелевом зазоре между ротором и корпусом происходит первый интенсивный контакт потока с фильтрующей поверхностью. Участок между входным и выходным патрубками является зоной наиболее интенсивного взаимодействия с каплями жидкости, влажной пленкой и фильтрующей поверхностью; именно здесь наблюдается наибольшее снижение скорости [5, 7, 10].

При увеличении $S_{акт}$ с 0,202 до 0,268 м² возросшая площадь контакта сопровождается снижением локальной скорости газа и увеличением расчётного времени взаимодействия потока с увлажнённой поверхностью. В рамках настоящего исследования эти изменения рассматриваются как аэродинамическая предпосылка интенсификации контакта «газ–жидкость–фильтр». Влияние активной площади на эффективность улавливания и гидравлическое сопротивление требует отдельного экспериментального подтверждения [7, 8, 13].

Связь полученных экспериментальных результатов с производственной задачей обусловлена тем, что мелкодисперсная пыль, образующаяся при производстве суперфосфата и аммофоса, не всегда может быть полностью уловлена только за счет инерционных сил. В роторно-фильтрующем аппарате замедление газового потока во влажной контактной среде может способствовать смачиванию и коагуляции частиц, а также их улавливанию на фильтрующей поверхности. Следовательно, знание распределения скорости газа по рабочим зонам позволяет интерпретировать эффективность аппарата не только эмпирически, но и с конструктивно-аэродинамических позиций [5, 7, 10].

С методической точки зрения результаты измерений, полученные с помощью анемометра BA06-TROTEC, позволяют сформировать внутреннюю аэродинамическую карту аппарата. Такой подход создаёт исходную основу для последующего моделирования взаимосвязей между гидравлическим сопротивлением, эффективностью очистки и энергозатратами [9, 15].

Заключение

1. Выполнены экспериментальные измерения распределения скорости газа в шести характерных зонах лабораторной модели роторно-фильтрующего аппарата.

2. Исследования проведены при трёх значениях активной площади фильтрующей поверхности: $S_{акт}$ = 0,202; 0,229 и 0,268 м², а также при пяти уровнях входной скорости газа.

3. Установлено, что увеличение активной площади фильтра сопровождается снижением скорости газа в щелевом зазоре между ротором и корпусом, на участке между входным и выходным патрубками, в конфузоре и в выходной зоне.

4. Наиболее выраженное торможение потока наблюдалось на рабочей поверхности B, в конфузоре и на выходе из аппарата. При $S_{акт}$ = 0,268 м² среднее снижение скорости в выходной зоне составило 82,3 %.

5. Линейные регрессионные зависимости вида $v_з = a\,v_{вх} + b$ характеризуются значениями R^2 от 0,8996 до 0,9775 и могут использоваться для оценки локальной скорости газа в пределах исследованного экспериментального диапазона.

6. Полученные результаты могут служить основой для дальнейшего выбора активной площади фильтрующей поверхности и отдельного исследования её влияния на гидравлическое сопротивление и эффективность очистки.

Список литературы

1. ГОСТ 12.3.018–79. ССБТ. Системы вентиляционные. Методы аэродинамических испытаний.
2. ГОСТ 17.2.4.06–90. Охрана природы. Атмосфера. Методы определения скорости и расхода газопылевых потоков, отходящих от стационарных источников загрязнения.
3. ГОСТ 17.2.4.07–90. Охрана природы. Атмосфера. Методы определения давления и температуры газовых потоков.
4. Исомидинов А.С. Исследование гидравлического сопротивления роторно-фильтрующего аппарата // Universum: технические науки. – 2019. – № 10–1 (67). – С. 54–58.
5. Byeon S.-H., Lee B.-K., Raj Mohan B. Removal of ammonia and particulate matter using a modified turbulent wet scrubbing system // Separation and Purification Technology. – 2012. – T. 98. – P. 221–229. – DOI: 10.1016/j.seppur.2012.07.014.
6. Cho K.-S., Lee Y.-Y., Jang S.-N., Yun J., Kwon J., Park H.-J., Seo Y. Removal of particulate matter from pork belly grilling gas using an orifice wet scrubber // Journal of Environmental Science and Health, Part A. – 2020. – T. 55, № 9. – P. 1125–1130. – DOI: 10.1080/10934529.2020.1773712.
7. Darbandi T., Risberg M., Westerlund L. Efficient Cleaning and Heat Recovery of Flue Gas from a Small-Scale Boiler // Chemical Engineering & Technology. – 2021. – T. 44, № 11. – P. 2116–2125. – DOI: 10.1002/ceat.202100274.
8. Darbandi T., Risberg M., Westerlund L. Enhancing particle segregation in stem wood combustion flue gas wet scrubbers: Experimental investigation of operational conditions // Case Studies in Thermal Engineering. – 2024. – T. 64. – Art. 105427. – DOI: 10.1016/j.csite.2024.105427.
9. Hoyos A., Joubert A., Bouhanguel A., Henry M., Durécu S., Le Coq L. Multiapproach Design Methodology of a Downscaled Wet Scrubber to Study the Collection of Submicronic Particles from Waste Incineration Flue Gas // Processes. – 2024. – T. 12, № 8. – Art. 1655. – DOI: 10.3390/pr12081655.

10. Lee B.-K., Mohan B.R., Byeon S.-H., Lim K.-S., Hong E.-P. Evaluating the performance of a turbulent wet scrubber for scrubbing particulate matter // Journal of the Air & Waste Management Association. – 2012. – T. 63, № 5. – P. 499–506. – DOI: 10.1080/10962247.2012.738626.
11. Mohan B., Biswas S., Meikap B. Performance characteristics of the particulates scrubbing in a counter-current spray-column // Separation and Purification Technology. – 2008. – T. 61, № 1. – P. 96–102. – DOI: 10.1016/j.seppur.2007.09.018.
12. Oliveira R.A.F., Guerra V.G., Lopes G.C. Improvement of collection efficiency in a cyclone separator using water nozzles: A numerical study // Chemical Engineering and Processing – Process Intensification. – 2019. – T. 145. – Art. 107667. – DOI: 10.1016/j.cep.2019.107667.
13. U.S. Environmental Protection Agency. Monitoring by Control Technique: Wet Scrubber for Particulate Matter [Electronic resource]. URL: https://www.epa.gov/air-emissions-monitoring-knowledge-base/monitoring-control-technique-wet-scrubber-particulate-matter (accessed: 28.09.2026).
14. Wansom A., Maneechot P., Jiteurtragool N., Vitidsant T. PM2.5 Collection Enhancement in a Smart Hybrid Wet Scrubber Tower // Processes. – 2023. – T. 11, № 12. – Art. 3306. – DOI: 10.3390/pr11123306.
15. Zhao L., You R., Liu J., Chen Q. A real-time measurement and analysis method for gas holdup in a wet scrubber with the use of image information entropy // Separation and Purification Technology. – 2024. – T. 345. – Art. 127255. – DOI: 10.1016/j.seppur.2024.127255.

References

1. GOST 12.3.018–79. SSBT. Sistemy ventilyatsionnye. Metody aerodinamicheskikh ispytanii [Occupational safety standards system. Ventilation systems. Methods of aerodynamic tests]. – 1979. (In Russ.).
2. GOST 17.2.4.06–90. Okhrana prirody. Atmosfera. Metody opredeleniya skorosti i raskhoda gazopylevykh potokov, otkhodyashchikh ot statsionarnykh istochnikov zagryazneniya [Nature protection. Atmosphere. Methods for determining velocity and flow rate of gas-dust flows emitted from stationary sources of pollution]. – 1990. (In Russ.).
3. GOST 17.2.4.07–90. Okhrana prirody. Atmosfera. Metody opredeleniya davleniya i temperatury gazovykh potokov [Nature protection. Atmosphere. Methods for determining pressure and temperature of gas flows]. – 1990. (In Russ.).
4. Isomidinov A.S. Issledovanie gidravlicheskogo soprotivleniya rotorno-filtruyushchego apparata [Study of hydraulic resistance of a rotary filter apparatus]. Universum: Tekhnicheskie Nauki. 2019;10–1(67):54–58. (In Russ.).
5. Byeon S.-H., Lee B.-K., Raj Mohan B. Removal of ammonia and particulate matter using a modified turbulent wet scrubbing system. Separation and Purification Technology. 2012;98:221–229. DOI: 10.1016/j.seppur.2012.07.014.

6. Cho K.-S., Lee Y.-Y., Jang S.-N., Yun J., Kwon J., Park H.-J., Seo Y. Removal of particulate matter from pork belly grilling gas using an orifice wet scrubber // Journal of Environmental Science and Health, Part A. – 2020. – DOI: 10.1080/10934529.2020.1773712.
7. Darbandi T., Risberg M., Westerlund L. Efficient Cleaning and Heat Recovery of Flue Gas from a Small-Scale Boiler. Chemical Engineering & Technology. 2021;44(11):2116–2125. DOI: 10.1002/ceat.202100274.
8. Darbandi T., Risberg M., Westerlund L. Enhancing particle segregation in stem wood combustion flue gas wet scrubbers: Experimental investigation of operational conditions. Case Studies in Thermal Engineering. 2024;64:105427. DOI: 10.1016/j.csite.2024.105427.
9. Hoyos A., Joubert A., Bouhanguel A., Henry M., Durécu S., Le Coq L. Multiapproach Design Methodology of a Downscaled Wet Scrubber to Study the Collection of Submicronic Particles from Waste Incineration Flue Gas. Processes. 2024;12(8):1655. DOI: 10.3390/pr12081655.
10. Lee B.-K., Mohan B.R., Byeon S.-H., Lim K.-S., Hong E.-P. Evaluating the performance of a turbulent wet scrubber for scrubbing particulate matter // Journal of the Air & Waste Management Association. – 2012. – DOI: 10.1080/10962247.2012.738626.
11. Mohan B., Biswas S., Meikap B. Performance characteristics of the particulates scrubbing in a counter-current spray-column. Separation and Purification Technology. 2008;61(1):96–102. DOI: 10.1016/j.seppur.2007.09.018.
12. Oliveira R.A.F., Guerra V.G., Lopes G.C. Improvement of collection efficiency in a cyclone separator using water nozzles: A numerical study. 13. Chemical Engineering and Processing – Process Intensification. 2019;145:107667. DOI: 10.1016/j.cep.2019.107667.
13. U.S. Environmental Protection Agency. U.S. Environmental Protection Agency. Monitoring by Control Technique: Wet Scrubber for Particulate Matter [Electronic resource]. Available at:. – URL: https://www.epa.gov/air-emissions-monitoring-knowledge-base/monitoring-control-technique-wet-scrubber-particulate-matter (accessed: 28.09.2026).
14. Wansom A., Maneechot P., Jiteurtragool N., Vitidsant T. PM2.5 Collection Enhancement in a Smart Hybrid Wet Scrubber Tower. Processes. 2023;11(12):3306. DOI: 10.3390/pr11123306.
15. Zhao L., You R., Liu J., Chen Q. A real-time measurement and analysis method for gas holdup in a wet scrubber with the use of image information entropy. Separation and Purification Technology. 2024;345:127255. DOI: 10.1016/j.seppur.2024.127255.

Статья поступила в редакцию: 23.09.2026
Статья принята к публикации: 28.09.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 66.074

DOI: 10.32743/UniTech.2026.151.10.23515

Экспериментальное исследование высоты газовой подушки в зоне смешения абсорбционного аппарата

Каримов Икромали Тожиматович
д-р техн. наук, проф.
Ферганский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Фергана

Халилов Исмоил Латифжон угли
независимый искатель, Ферганский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Фергана
E-mail: halilov.5710@gmail.com

Experimental study of the gas-cushion height in the mixing zone of an absorption apparatus

Karimov Ikromali Tojimatovich
doctor of Technical Sciences, Professor
Fergana State Technical University
Republic of Uzbekistan, Fergana

Khalilov Ismoil Latifjon ugli
Independent Researcher
Fergana State Technical University
Republic of Uzbekistan, Fergana

Аннотация

В статье представлены результаты экспериментального исследования высоты газовой подушки в зоне смешения новой конструкции тарельчатого барботажного абсорбционного аппарата. Цель работы заключается в экспериментальном определении изменения высоты газовой подушки при изменении диаметра газопередающих отверстий и расхода газа, а также в сопоставлении экспериментальных результатов с расчетными значениями и установлении практических закономерностей для выбора параметров газораспределительного элемента. Исследовано влияние диаметра газопередающих отверстий газораспределительной насадки и расхода газа на формирование газовой подушки при подаче воздуха и воды. В экспериментальной установке использованы отверстия диаметром d_0 = 1; 1,5 и 2 мм при четырех отверстиях каждого диаметра. Расход газа изменяли от 0,15 до 0,55 м³/ч с шагом 0,10

Библиографическое описание: Каримов И.Т., Халилов И.Л.У. Экспериментальное исследование высоты газовой подушки в зоне смешения абсорбционного аппарата // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23515

м³/ч, а расход жидкости составлял 0,023; 0,031 и 0,039 м³/ч. Для каждого режима определяли экспериментальную высоту газовой подушки по показаниям миллиметровой шкалы, установленной на прозрачной измерительной трубке. Полученные значения сопоставлены с теоретическими расчетами по уравнению гидродинамического равновесия в зоне смешения. Показано, что увеличение расхода газа приводит к росту высоты газовой подушки, тогда как увеличение диаметра газопередающего отверстия снижает ее величину за счет уменьшения гидравлического сопротивления. Изменение расхода жидкости в исследованном диапазоне не оказало заметного влияния на высоту газовой подушки. Полученные результаты могут быть использованы при выборе диаметра отверстий и проектировании барботажного патрубка промышленного абсорбционного аппарата.

Abstract

The paper presents the results of an experimental study of gas-cushion height in the mixing zone of a new tray-type bubble absorption apparatus. The aim of the study is to experimentally determine the variation in gas-cushion height with changes in gas-transfer orifice diameter and gas flow rate, compare the experimental results with calculated values, and establish practical relationships for selecting gas-distributor parameters. The effects of the diameter of gas-transfer orifices in the gas distributor and gas flow rate on gas-cushion formation were investigated using air and water. The experimental setup employed four gas-transfer orifices for each diameter of d_0 = 1, 1.5 and 2 mm. The gas flow rate was varied from 0.15 to 0.55 m³/h with an increment of 0.10 m³/h, while the liquid flow rate was set to 0.023, 0.031 and 0.039 m³/h. For each operating condition, the experimental gas-cushion height was determined from a millimeter scale installed on a transparent measuring tube. The measured values were compared with theoretical calculations obtained from the hydrodynamic balance equation for the mixing zone. The results show that increasing the gas flow rate increases the gas-cushion height, whereas increasing the gas-transfer orifice diameter decreases it because of lower hydraulic resistance. Variation of the liquid flow rate within the investigated range had no noticeable effect on the gas-cushion height. The obtained results can be used to select gas-distributor orifice diameters and to design the bubbling nozzle of an industrial absorption apparatus.

Ключевые слова: абсорбер, барботаж, газовая подушка, газораспределитель, диаметр отверстия, расход газа, расход жидкости.

Keywords: absorber, bubbling, gas cushion, gas distributor, orifice diameter, gas flow rate, liquid flow rate.

Введение

Совершенствование абсорбционных аппаратов для газоочистки и интенсификации массообмена связано с одновременным снижением металлоемкости, гидравлического сопротивления и энергетических затрат. Для барботажных аппаратов ключевое значение имеют устойчивое распределение газа в жидкой фазе и развитая поверхность контакта фаз. Современные экспериментальные и численные исследования показывают, что

газосодержание и режим течения чувствительны к скорости газа, характеристикам газогенератора, размерам и конфигурации отверстий, свойствам жидкой фазы и наличию внутренних элементов [1–5, 7, 9, 10].

Chen и Brooks показали, что изменение поверхностной скорости газа отражается на локальном распределении газовой фазы, общем газосодержании и поле скоростей жидкой фазы [1]. Gong и соавт. установили влияние рабочих условий и характеристик газогенератора на газосодержание пузырьковой колонны [2]. Haydar и соавт. показали, что свойства жидкой фазы и геометрические условия канала влияют на газосодержание и переходы между режимами течения [3]. Современные исследования также подтверждают влияние внутренних элементов и геометрии газораспределительных устройств на гидродинамику газожидкостных систем [4, 7, 8]. Эти результаты обосновывают необходимость экспериментальной оценки высоты газовой подушки в локальной зоне смешения конкретного барботажного аппарата.

Цель настоящего исследования заключается в экспериментальном определении изменения высоты газовой подушки в зоне смешения тарельчатого барботажного абсорбционного аппарата при изменении диаметра газопередающих отверстий и расхода газа, а также в сопоставлении экспериментальных результатов с расчетными значениями и установлении практических закономерностей для выбора параметров газораспределительного элемента.

Материалы и методы

В результате теоретического анализа гидродинамики аппарата получена зависимость для расчета высоты газовой подушки в зоне смешения. Она учитывает сопротивление газоподающего отверстия, скорость газа, плотность фаз, коэффициент пульсации и сопротивление элементов, расположенных в зоне смешения [6].

$$h = \xi_o \frac{[K w_o]^2 \rho_г}{2g\Delta\rho} - (\xi_1 + \xi_2 + \xi_{вх}) \frac{\rho_c \cdot w_c^2}{2g\Delta\rho} \quad (1)$$

В расчетной зависимости ξ_0 — коэффициент сопротивления отверстия барботажной трубки; ω_0 — расходная скорость газа при прохождении через отверстие, м/с; $\rho_г$ — плотность газа, кг/м³; K — коэффициент пульсации; ξ_1 и ξ_2 — коэффициенты сопротивления первой и второй мелкоперфорированных тарелок в зоне смешения; $\xi_{вх}$ — коэффициент сопротивления при входе абсорбента в барботажный патрубок; ρ_c — плотность жидкости, кг/м³; g — ускорение свободного падения, 9,8 м/с²; Δρ — разность плотностей фаз, кг/м³.

Для проверки расчетной зависимости был изготовлен экспериментальный образец абсорбционного аппарата. На рисунке 1 приведена схема экспериментальной установки, а на рисунке 2 — ее общий вид. Газ и жидкость подавались в зону смешения через газораспределительный элемент с четырьмя отверстиями выбранного диаметра. Высоту газовой подушки определяли в прозрачной измерительной трубке с миллиметровой шкалой.

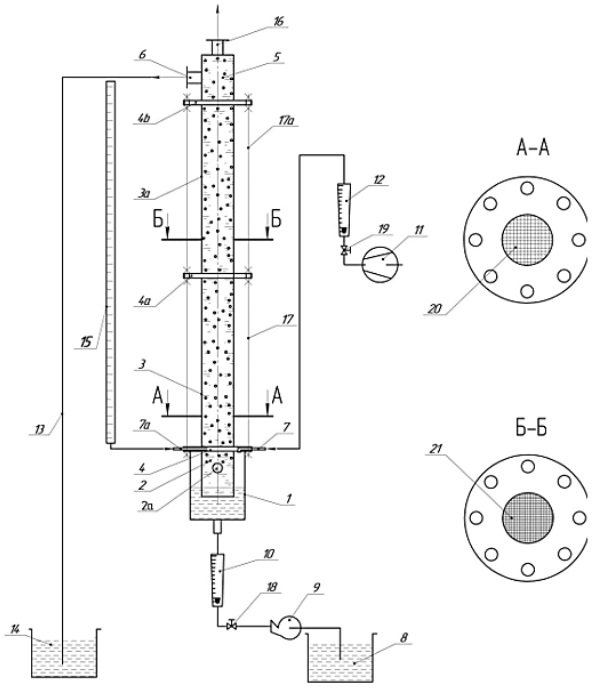


Рисунок 1. Схема экспериментальной установки

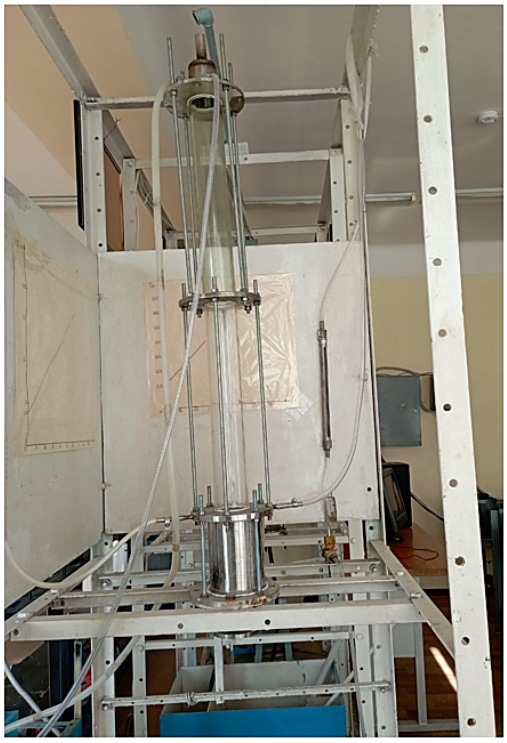


Рисунок 2. Общий вид экспериментальной установки

1 — газораспределительный блок; 2 — газораспределительная насадка; 2а — газопередающее отверстие; 3 — нижняя секция; 3а — верхняя секция; 4, 4а, 4б — фланцы; 5 — разделительная часть; 6 — трубопровод насыщенного абсорбента; 7 — газоподводящий канал; 8 — емкость для абсорбента; 9 — насос; 10 — ротаметр; 11 — компрессор; 12 — ротаметр газа; 13 — емкость насыщенного абсорбента; 14 — трубопровод отвода абсорбента; 15 — соединительная трубка; 16 — трубопровод очищенного газа; 17 — стяжные шпильки; 18 — вентиль абсорбента; 19 — газовый вентиль; 20 — крупная сетка; 21 — мелкая сетка

Результаты и обсуждение

Экспериментальные исследования выполнены при следующих основных варьируемых параметрах.

Диаметр газопередающих отверстий газораспределительной насадки составлял d_0 = 1; 1,5 и 2 мм, число отверстий — 4 для каждого диаметра, шаг изменения диаметра — 0,5 мм. Расход газа $Q_г$ изменяли от 0,15 до 0,55 м³/ч с шагом 0,10 м³/ч. В качестве газовой фазы использовали воздух, а в качестве абсорбента — воду. Расход жидкости Q_c изменяли в диапазоне 0,023; 0,031 и 0,039 м³/ч с шагом 0,008 м³/ч.

На первом этапе открывали отверстие d_0= 1 мм и устанавливали постоянный расход жидкости Q_c = 0,023 м³/ч. При расходах газа $Q_г$ = 0,15; 0,25; 0,35; 0,45 и 0,55 м³/ч экспериментальная высота газовой подушки h составляла соответственно 19; 24; 40; 57 и 80 мм. Измерение выполняли по миллиметровой шкале на прозрачной трубке, установленной в зоне распределения газа (рисунок 3).

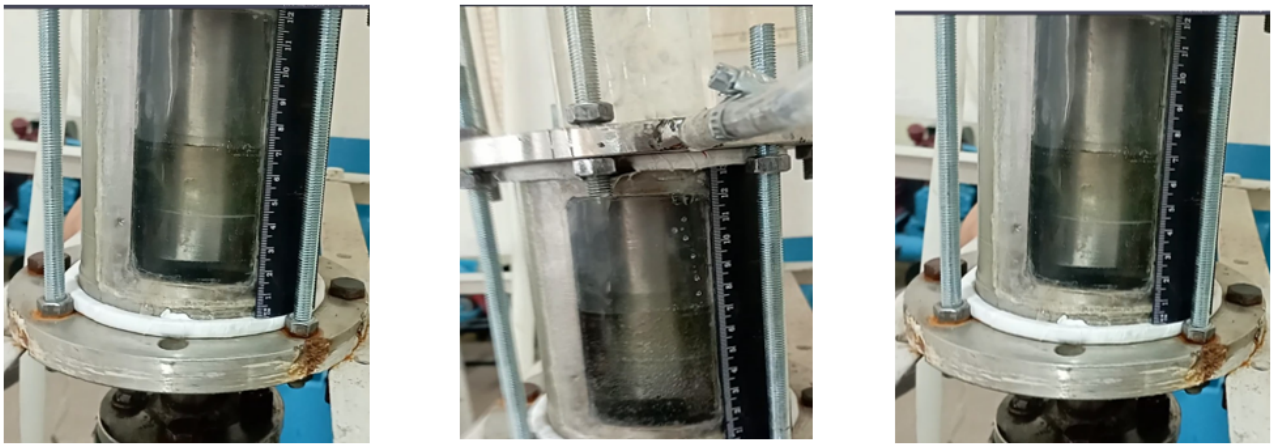


Рисунок 3. Экспериментальный метод определения высоты газовой подушки

При увеличении расхода жидкости до Q_c = 0,031 м³/ч при тех же расходах газа получены те же значения высоты газовой подушки: h = 19; 24; 40; 57 и 80 мм. Изменение расхода жидкости до Q_c = 0,039 м³/ч также не привело к заметному изменению результатов. Следовательно, в исследованном диапазоне режимов влияние расхода жидкости на высоту газовой подушки оказалось незначительным.

На следующем этапе отверстие d_0 = 1 мм закрывали и открывали отверстие d_0 = 1,5 мм. При последовательном увеличении расхода газа от 0,15 до 0,55 м³/ч высота газовой подушки изменялась от 6 до 74 мм: h = 6; 14; 31; 52 и 74 мм соответственно.

Затем отверстие d_0 = 1,5 мм закрывали и открывали отверстие d_0 = 2 мм. При тех же расходах газа получили значения h = 2; 10; 26; 40 и 60 мм соответственно. Сопоставление режимов показало, что увеличение диаметра газопередающего отверстия приводит к уменьшению высоты газовой подушки. Дополнительные перфорированные тарелки с отверстиями d = 1; 1,5 и 2 мм не оказали заметного влияния непосредственно на высоту газовой подушки. Их основная роль заключается в дополнительном диспергировании пузырьков и увеличении поверхности контакта фаз, тогда как увеличение количества внутренних элементов может сопровождаться ростом гидравлического сопротивления и изменением макрогидродинамики [5, 7].

При прохождении газа через отверстия он диспергируется в жидкой фазе и в виде пузырьков поднимается вверх под действием разности плотностей. Движение пузырьков турбулизирует жидкость и увеличивает площадь межфазного контакта. Высота газовой подушки определяется, прежде всего, сопротивлением газоподающих отверстий и условиями движения фаз. Увеличение диаметра отверстия уменьшает отношение толщины стенки к диаметру δ/d и, как следствие, снижает сопротивление прохождению газа.

Теоретические значения высоты газовой подушки для исследованных режимов рассчитаны по уравнению (1). Ниже приведен пример расчета для отверстия диаметром d_0 = 1 мм.

Пример расчета

Для примера принимаем d_0 = 1 мм, скорость газа ω_0 = 13,2 м/с, скорость жидкости ω_c = 0,021 м/с, коэффициент сопротивления отверстия ξ_0 = 1,9. Подстановка исходных данных в уравнение (1) дает расчетную высоту газовой подушки $h_{теор}$ = 19,76 мм.

$$h = \xi_o \frac{[Kw_o]^2 \rho_г}{2g\Delta\rho} - (\xi_1 + \xi_2 + \xi_{вх}) \frac{\rho_c \cdot w_c^2}{2g\Delta\rho} == 1,9 \cdot \frac{[1 \cdot 13,2]^2 \cdot 1,29}{2 \cdot 9,8 \cdot 998,71} - (1,3 + 0,46 + 0,46) \cdot \frac{1000 \cdot (0,021)^2}{2 \cdot 9,8 \cdot 998,71} = 19,76$$

Экспериментальное значение составило $h_{экс}$ = 19 мм. Относительное расхождение между расчетным и экспериментальным значениями составило Δ = 4 %, что подтверждает приемлемость расчетной зависимости для исследованного режима.

Экспериментальные данные обработаны с использованием компьютерной программы, после чего построен график зависимости высоты газовой подушки h_0 от расхода газа $Q_г$ (рисунок 4).

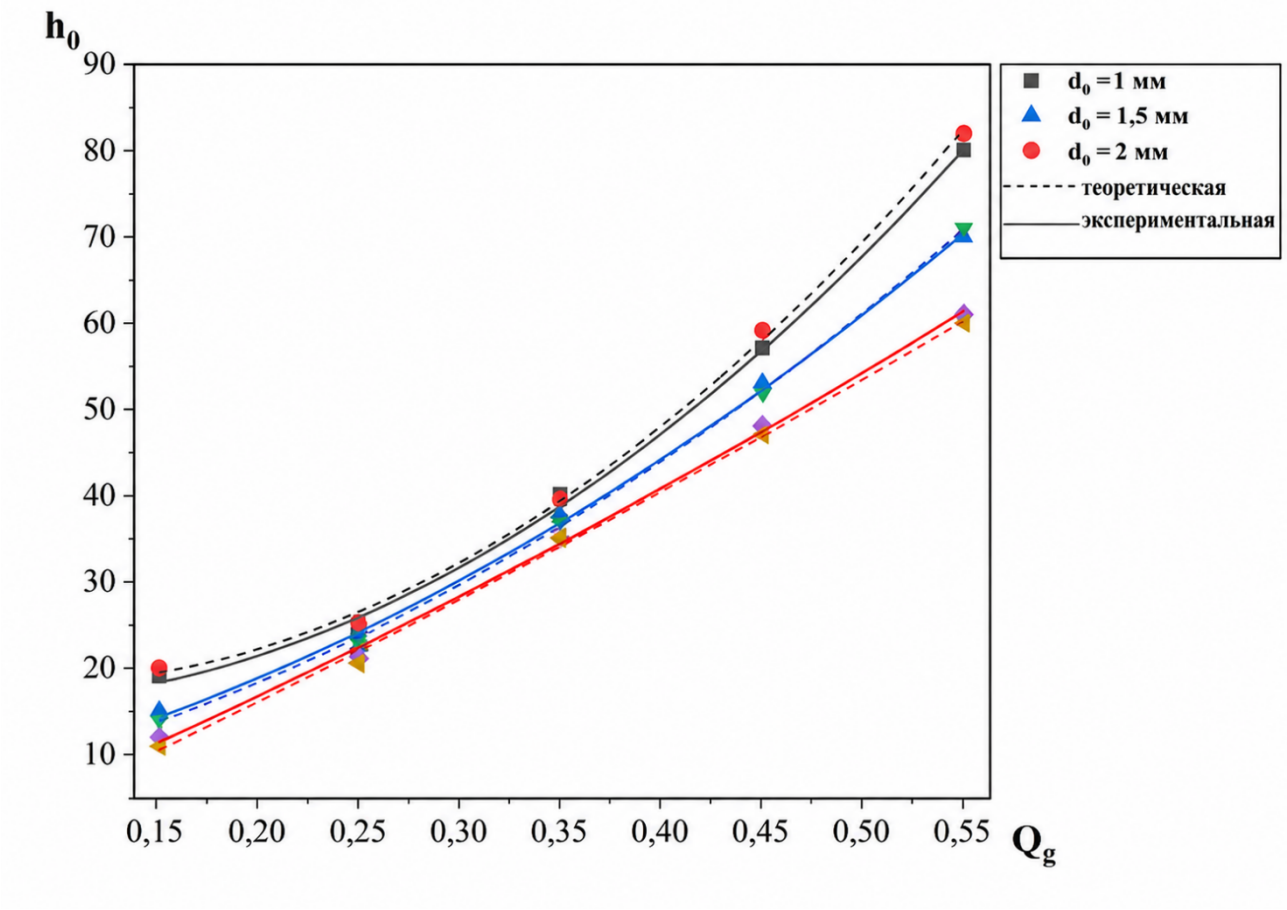


Рисунок 4. Зависимость высоты газовой подушки h 0 от расхода газа Q г : сравнение теоретических и экспериментальных значений

Полученные регрессионные зависимости

$$y = 155x - 10{,}25 \quad R^2 = 0{,}9587$$
$$y = 140{,}5x - 9{,}575 \quad R^2 = 0{,}9842$$
$$y = 125x - 8{,}35 \quad R^2 = 0{,}9957$$

Как видно из рисунка 4, с увеличением расхода газа высота газовой подушки закономерно возрастает. При увеличении диаметра газопередающего отверстия высота газовой подушки, напротив, уменьшается. Такое поведение объясняется снижением гидравлического сопротивления отверстия при увеличении его диаметра, что облегчает прохождение газового потока в зону смешения. Полученная закономерность согласуется с современными исследованиями влияния параметров газораспределителя, размеров пузырьков и скорости газа на газосодержание и гидродинамику пузырьковых аппаратов [2, 5, 7, 9, 10].

При проектировании промышленного варианта аппарата значение высоты газовой подушки может быть принято, как один из расчетных параметров, определяющих конструктивные размеры и режим работы барботажного патрубка. Практически это позволяет увязать диаметр газопередающих отверстий с требуемой интенсивностью подачи газа и допустимым гидравлическим сопротивлением.

Заключение

Выполненные экспериментальные исследования позволили установить закономерности изменения высоты газовой подушки в зоне смешения тарельчатого барботажного абсорбционного аппарата. При увеличении расхода газа от 0,15 до 0,55 м³/ч высота газовой подушки возрастала для всех исследованных диаметров отверстий. При изменении диаметра газопередающего отверстия от 1 до 2 мм высота газовой подушки уменьшалась, что связано со снижением сопротивления прохождению газового потока. Изменение расхода жидкости в диапазоне 0,023–0,039 м³/ч не оказало заметного влияния на полученные значения. Расчетное значение для рассмотренного режима составило 19,76 мм при экспериментальном значении 19 мм и расхождении 4 %. Полученные результаты подтверждают применимость исследуемой расчетной зависимости и могут быть использованы при выборе параметров газораспределительного элемента и проектировании барботажного патрубка.

Список литературы

1. Chen J., Brooks C.S. Experiments and CFD simulation of mass transfer and hydrodynamics in a cylindrical bubble column // Chemical Engineering Science. – 2021. – T. 234. – Art. 116435. – DOI: 10.1016/j.ces.2020.116435.
2. Gong C.-K., Xu X., Yang Q. Gas holdup at dynamic equilibrium region of a bubble column: Effect of bubble generator performance // Chemical Engineering Journal. – 2022. – T. 443. – Art. 136382. – DOI: 10.1016/j.cej.2022.136382.
3. Haydar A., Blel W., Marec H., Gentric C. Gas holdup and flow regimes in a thin-gap bubble column with Newtonian and non-Newtonian liquid phase // Chemical Engineering & Technology. – 2023. – T. 46, № 6. – P. 1218–1227. – DOI: 10.1002/ceat.202200561.

4. Heydari N., Larachi F., Kipping R. et al. Mass transfer performance and hydrodynamics of a bubble column reactor at offshore floating conditions // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2023. – T. 62, № 31. – P. 12183–12190. – DOI: 10.1021/acs.iecr.3c01600.
5. Jonach T., Ruzova T., Jordan C., Harasek M., Haddadi B. The Influence of the Geometric Properties on the Gas Holdup and Phase Surface Area for Single-Orifice Gas Distributors in a Bubble Column // ChemEngineering. – 2025. – T. 9, № 2. – DOI: 10.3390/chemengineering9020029.
6. Karimov I.T., Isomiddinov A.S., Madaminova G.I., Xalilov I.L. Gazlift apparati: Patent of the Republic of Uzbekistan No. IAP 7727. – Tashkent, 2024. (In Russ.).
7. Liu S., Liang J., Li Q., Yu H., Wang H., Li X., Yang C. Effects of internals on macroscopic fluid dynamics in a bubble column // Chinese Journal of Chemical Engineering. – 2025. – T. 77, № 1. – P. 19–29. – DOI: 10.1016/j.cjche.2024.10.005.
8. Orlando A.E. Jr., Barca L.F., Heindel T.J., Klein T.S., Medronho R.A. Gas holdup and flow regime in a bubble column that includes enhanced oil recovery chemicals // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2021. – T. 204. – Art. 108675. – DOI: 10.1016/j.petrol.2021.108675.
9. Wang L.-H., Liao H.-L., Zheng L., Fan Z.-X., Zou H.-K., Luo Y. Microbubble swarm in a HiGee-aided bubble column reactor: Size, gas holdup, and effective interfacial area // AIChE Journal. – 2025. – T. 71, № 6. – DOI: 10.1002/aic.18804.
10. Wen J., Tian R., Tan S., Wang B. et al. Numerical simulation of gas holdup in nocoalescence media of industrial-scale bubble column // Progress in Nuclear Energy. – 2022. – T. 146. – Art. 104172. – DOI: 10.1016/j.pnucene.2022.104172.

Статья поступила в редакцию: 10.10.2026
Статья принята к публикации: 17.10.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 544.723+549.67

DOI: 10.32743/UniTech.2026.151.10.23573

Физико-химический анализ структурных и пористых характеристик натриевой и цинковой форм

Комолова Гульнора Комиловна
базовый докторант
Ташкентский химико-технологический институт
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: gulnorakomolova26@gmail.com

Юсупова Лола Азимовна
д-р техн. наук, проф.
Ташкентский химико-технологический институт
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: lolayusupova111@gmail.com

Исмаилов Бобурбек Махмуджанович
д-р филос. в обл. техн. наук, PhD, доц.
кафедра Химическая технология переработки нефти и газа, Ташкентский химико-технологический институт
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: boburbek.89@mail.ru

Physicochemical analysis of the structural and porous characteristics of the sodium and zinc forms

Komolova Gulnora
Basic doctoral student
Tashkent Institute of Chemical Technology
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Yusupova Lola
doctor of Technical Sciences, Professor
Tashkent Institute of Chemical Technology
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Ismailov Boburbek
doctor of Philosophy in Technical Sciences, PhD, Associate Professor
Department of Chemical technology of oil and gas refining, Tashkent Institute of Chemical Technology
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Библиографическое описание: Комолова Г.К., Юсупова Л.А., Исмаилов Б.М. Физико-химический анализ структурных и пористых характеристик натриевой и цинковой форм // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23573

Аннотация

В статье представлены результаты сравнительного исследования натриевой и цинковой форм цеолита с использованием комплекса физико-химических методов анализа. Цель работы заключается в установлении взаимосвязи между катионным составом, структурными характеристиками и параметрами пористой системы исследуемых алюмосиликатных материалов. Для исследования использованы данные рентгенофазового анализа (XRD), инфракрасной Фурье-спектроскопии (FTIR), низкотемпературной адсорбции–десорбции азота, рентгенофлуоресцентного анализа (XRF), сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии с энергодисперсионной спектроскопией (SEM–EDS и TEM–EDS), а также термического анализа (TGA/DTA). По результатам многоточечного метода Брунауэра–Эммета–Теллера удельная поверхность натриевого образца составляет 12,681 м²/г, а цинкового — 21,633 м²/г. Таким образом, для исследованного цинксодержащего образца установлено увеличение удельной поверхности приблизительно на 70,6 %. Площадь микропористой поверхности, рассчитанная методом t-графика, увеличивается с 3,513 до 13,797 м²/г, а объём микропор — с 0,001628 до 0,006612 см³/г. По данным FTIR, основная полоса колебаний алюмосиликатного каркаса смещается с 989 до 991 см$^{-1}$, тогда как полоса валентных колебаний O–H — с 3373 до 3358 см$^{-1}$. Сохранение основных спектральных особенностей и характерных дифракционных максимумов свидетельствует о сохранении признаков кристаллической цеолитной структуры после введения цинка. Результаты XRF, SEM–EDS и TEM–EDS подтверждают присутствие цинка в исследуемом образце, хотя количественные значения содержания элемента различаются в зависимости от метода анализа. Полученные результаты показывают, что цинксодержащая форма характеризуется более высокими значениями удельной поверхности и расчётных параметров микропористости. При этом интерпретация различий требует учёта фазового состава, условий гидратации и особенностей применённых методов измерения. Установленные закономерности представляют интерес для дальнейшей оценки возможности применения модифицированных цеолитов в процессах адсорбции, разделения газов и катализа.

Abstract

This paper presents a comparative study of sodium and zinc forms of zeolite using a comprehensive set of physicochemical characterization methods. The aim was to evaluate the relationship between cation composition, structural characteristics, and pore-system parameters of the investigated aluminosilicate materials. The study draws on X-ray diffraction (XRD), Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), nitrogen adsorption–desorption, X-ray fluorescence analysis (XRF), scanning and transmission electron microscopy coupled with energy-dispersive spectroscopy (SEM–EDS and TEM–EDS), and thermogravimetric and differential thermal analysis (TGA/DTA). According to the multipoint Brunauer–Emmett–Teller method, the specific surface area of the sodium sample is 12.681 m²/g, compared with 21.633 m²/g for the zinc-containing sample, corresponding to an increase of approximately 70.6 %. The microporous surface area calculated using the t-plot method increases from 3.513 to 13.797 m²/g, while the micropore volume increases from 0.001628 to 0.006612 cm³/g. FTIR analysis shows a shift in the main aluminosilicate framework band from 989 to 991 cm^{-1} and a shift in the O–H stretching band from 3373 to 3358 cm^{-1}. The retention of the principal spectral features and characteristic diffraction maxima indicates

that the zinc-containing sample retains important features of a crystalline zeolitic structure. XRF, SEM–EDS, and TEM–EDS results support the presence of zinc, although the reported concentrations differ between analytical techniques. The findings indicate that the zinc-containing sample exhibits higher specific surface area and calculated microporosity parameters. However, these differences must be interpreted in conjunction with phase composition, hydration state, and the limitations of the individual analytical methods. The results provide a basis for further investigation of modified zeolites for adsorption, gas separation, and catalytic applications.

Ключевые слова: цеолит, натриевая форма, цинковая форма, ионный обмен, рентгенофазовый анализ, ИК-Фурье-спектроскопия, удельная поверхность, микропористость, адсорбция азота, алюмосиликатный каркас.

Keywords: zeolite, sodium form, zinc form, ion exchange, X-ray diffraction, FTIR spectroscopy, specific surface area, microporosity, nitrogen adsorption, aluminosilicate framework.

Введение

Цеолиты представляют собой кристаллические алюмосиликаты с развитой системой каналов и полостей, размеры которых определяются особенностями пространственной организации тетраэдров кремния и алюминия. Благодаря регулируемой пористой структуре, способности к катионному обмену и наличию внутренних активных центров цеолиты широко рассматриваются как перспективные материалы для адсорбционных, разделительных и каталитических процессов. Их функциональные характеристики зависят от типа кристаллического каркаса, соотношения кремния и алюминия, природы компенсирующих катионов, степени гидратации и условий предварительной обработки [5, 9, 10]. Одним из наиболее распространённых способов модифицирования цеолитов является замещение исходных катионов другими катионами посредством ионного обмена. Такой подход позволяет изменять локальное электрическое поле внутри пор, распределение адсорбционных центров и взаимодействие поверхности с молекулами адсорбата. При этом изменение катионного состава не обязательно сопровождается разрушением основного алюмосиликатного каркаса [6, 7, 1, 3]. В зависимости от природы катиона, условий обработки и исходной структуры могут изменяться положение молекул воды, доступность отдельных пор, параметры элементарной ячейки и измеряемые адсорбционные характеристики. Особый интерес представляет сравнение натриевой и цинковой форм цеолита. Ионы натрия участвуют в компенсации отрицательного заряда алюмосиликатного каркаса, тогда как введение цинка может изменять локальные взаимодействия внутри пористой системы. Потенциальные изменения проявляются в результатах спектроскопических исследований, рентгенофазового анализа и измерения удельной поверхности. Однако увеличение измеряемой площади поверхности не следует рассматривать как прямое доказательство образования новых пор: оно также может быть связано с изменением доступности существующих пор, степени гидратации, состояния агломератов или особенностей предварительной обработки образца. Для корректной интерпретации таких изменений необходимо использовать взаимодополняющие методы анализа. Рентгенофазовый анализ позволяет оценивать кристаллическую структуру и фазовый состав. ИК-Фурье-спектроскопия используется для исследования колебаний

связей в алюмосиликатном каркасе и взаимодействий с водой. Адсорбция азота при низкой температуре даёт возможность оценивать удельную поверхность и характеристики пористой системы. Рентгенофлуоресцентный анализ характеризует валовой элементный состав, а электронная микроскопия с энергодисперсионной спектроскопией позволяет исследовать морфологию и локальный элементный состав. Термический анализ, в свою очередь, используется для изучения изменения массы и тепловых эффектов при нагревании. Актуальность комплексного подхода заключается в том, что отдельный метод не позволяет исчерпывающе описать состояние модифицированного цеолита. Например, обнаружение цинка в составе образца подтверждает его присутствие, но не устанавливает однозначно положение атомов цинка в структуре [4, 2]. Аналогично сохранение характерных дифракционных максимумов указывает на сохранение кристаллического порядка, но само по себе не доказывает полного отсутствия структурных изменений.

Цель работы. Целью настоящей работы является сравнительная оценка физико-химических, структурных и пористых характеристик исследованных натриевого (Na) и цинксодержащего (Zn) образцов цеолита, направленная на выявление взаимосвязей между их катионным и фазовым составом, особенностями алюмосиликатного каркаса, состоянием гидратации и доступностью пористой системы. Для достижения этой цели предусматривается комплексное сопоставление результатов рентгенофазового анализа (XRD), ИК-Фурье-спектроскопии (FTIR), низкотемпературной адсорбции–десорбции азота с расчётом параметров BET и t-plot, рентгенофлуоресцентного анализа (XRF), электронной микроскопии с энергодисперсионной спектроскопией (SEM–EDS и TEM–EDS) и термического анализа (TGA/DTA). Особое внимание уделяется оценке сохранности кристаллических признаков цеолита, различий в удельной поверхности и расчётных характеристиках микропористости, а также разграничению наблюдаемых экспериментальных различий и возможных причин их возникновения с учётом фазового состава, гидратации и условий подготовки образцов.

Материалы и методы исследования

Объектами исследования являлись два архивных образца цеолита, обозначенные в исходных материалах как Na и Zn. Образец Na рассматривался как натриевая форма, а образец Zn — как цинксодержащая форма материала. Согласно приведённым результатам рентгенофазового анализа, натриевый образец преимущественно идентифицирован как цеолит X с небольшой долей цеолита A. Для цинксодержащего образца представлены варианты идентификации цинксодержащих фаз цеолита X и миноритарной фазы цеолита A. При интерпретации результатов следует учитывать, что образцы различаются не только обозначенным катионным составом, но потенциально могут отличаться фазовым соотношением, гидратацией и историей предварительной обработки. Поэтому выявленные различия корректно описывать как различия между исследованными образцами Na и Zn. Для строгого доказательства причинной связи между ионным обменом и изменениями характеристик требуется подтверждение одинакового исходного материала и документирование процедуры модифицирования.

Использованные методы анализа. В работе использованы результаты следующих методов:

• **XRD** — исследование кристаллической структуры, положения дифракционных максимумов и фазового состава.

• **FTIR** — определение характерных полос колебаний O–H, H–O–H и связей алюмосиликатного каркаса.

• **Адсорбция–десорбция азота** — оценка удельной поверхности методом BET и характеристик пористой системы с использованием t-метода, DFT и BJH.

• **XRF** — оценка валового элементного и оксидного состава.

• **SEM–EDS** — исследование морфологии частиц и локального элементного состава.

• **TEM–EDS** — исследование ультраструктуры и локального элементного состава в исследуемых областях.

• **TGA/DTA** — анализ изменения массы и тепловых эффектов при нагревании [8].

Согласно отчёту, измерения адсорбции азота проводились на анализаторе Autosorb iQ при температуре 77,35 K. Перед измерениями образцы дегазировали при 200 °C в течение 1,6 ч. Масса натриевого образца составляла 0,1227 г, цинкового — 0,1086 г. Для расчёта многоточечной удельной поверхности BET использовался диапазон относительного давления $P/P_0 = 0,051–0,251$. Указанные условия являются существенными для сопоставления результатов, поскольку степень дегазации и удаления адсорбированной воды может влиять на доступность пор и величины, получаемые при адсорбционных измерениях.

Принципы обработки и интерпретации данных. Для сравнения адсорбционных характеристик использовали абсолютные значения параметров, приведённые в отчёте, и относительное изменение показателя для образца Zn по сравнению с Na:

$$\Delta X = \frac{X_{Zn} - X_{Na}}{X_{Na}} \times 100\%.$$

Этот показатель характеризует относительное различие между двумя образцами, но не является оценкой статистической значимости. Поскольку сведения о числе независимых повторных измерений и доверительных интервалах адсорбционных параметров не представлены, результаты рассматриваются как сравнительные значения измеренных образцов. Методы BET, t-plot, DFT и BJH характеризуют различные аспекты пористой структуры и основаны на разных моделях. Поэтому их результаты не следует непосредственно отождествлять. В частности, метод BET используется для оценки удельной поверхности, t-метод позволяет разделять условный вклад микропористой и внешней поверхности, DFT применяется для моделирования распределения пор, а BJH обычно используют для оценки мезопористой составляющей в пределах применимости выбранной модели [10, 9].

Результаты и их обсуждение

Результаты рентгенофазового анализа. Сравнение дифракционных картин. На рисунке 1 представлены нормированные дифрактограммы натриевой и цинксодержащей форм цеолита. В обоих образцах отмечаются дифракционные максимумы приблизительно

при 7,45°, 12,82–12,83°, 17,60–17,65°, 20,91°, 25,85° и около 30°. Дополнительные интенсивные особенности присутствуют в области 34,4° для натриевого образца и около 43,3° для цинксодержащего образца.

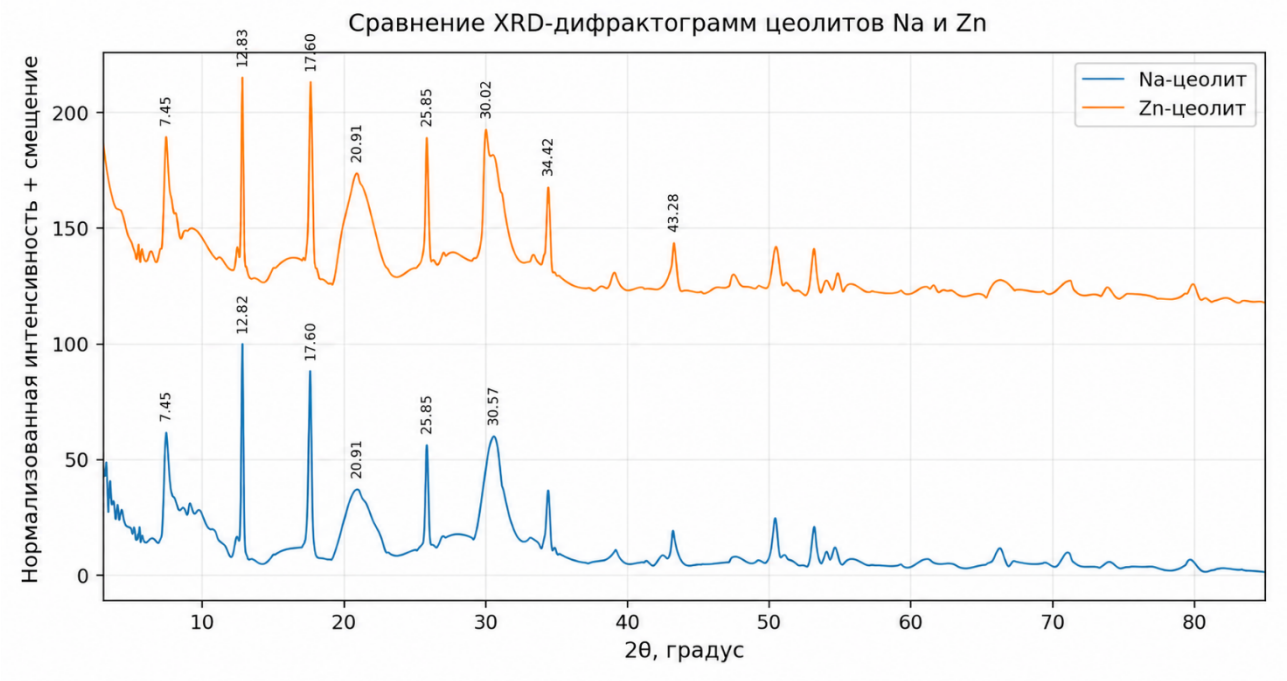


Рисунок 1. Сравнение нормированных дифрактограмм натриевой и цинковой форм цеолита

Сохранение ряда характерных дифракционных максимумов указывает на то, что оба образца содержат кристаллическую составляющую. В цинксодержащем образце сохраняются положения нескольких основных пиков, присутствующих в натриевом образце. При этом наблюдаются различия в относительной интенсивности и форме отдельных максимумов. Такие различия могут быть обусловлены несколькими факторами: изменением катионного состава, различной степенью гидратации, перераспределением интенсивности между фазами, текстурной ориентацией кристаллитов и особенностями подготовки образцов. При сравнении нормированных дифрактограмм необходимо учитывать, что нормирование изменяет относительное представление интенсивностей и не позволяет напрямую определять абсолютное количество кристаллической фазы. Следовательно, сходство положений основных максимумов согласуется с сохранением существенных элементов кристаллической структуры после модифицирования, но для количественной оценки структурных изменений необходимо дополнительно анализировать исходные дифракционные данные, фон, ширину пиков и параметры использованной модели уточнения.

Результаты фазовой идентификации

В отчёте приведены следующие результаты уточнения фазового состава.

Таблица 1. Фазовый состав по данным XRD/WPPF согласно исходному отчёту

Образец	Идентифицированная фаза	Массовая доля, %	Параметр решётки, Å
Na	Na-цеолит X, обезвоженный	89,5 ± 0,2	25,76530
Na	Na-цеолит A, обезвоженный	10,4 ± 0,2	12,19334
Na	Na-цеолит X, обменённый, следовая фаза	0,05 (оценка отчёта)	25,63613
Na	Na-цеолит X, гидратированный, следовая фаза	0,05 (оценка отчёта)	25,61778
Zn	Zn-цеолит X, гидратированный	47 ± 10	11,95371
Zn	Zn-цеолит A, вакуумированный	6 ± 4	11,93171
Zn	Zn-цеолит X	47 ± 11	11,93947

Примечание: значения воспроизведены из предоставленного отчёта. Приведённые оценки требуют проверки по исходному протоколу уточнения фаз.

Согласно таблице, натриевый образец преимущественно идентифицирован как цеолит X, тогда как для цинксодержащего образца представлены два варианта цеолита X и один вариант цеолита A. При этом оценённые параметры решётки цинксодержащих фаз находятся в диапазоне 11,9317–11,9537 Å, что требует дополнительной проверки единиц, индексации и модели кристаллической ячейки. Эти значения заметно отличаются от параметра решётки натриевой фазы цеолита X, указанного в отчёте как 25,76530 Å. Без исходного файла уточнения нельзя уверенно заключить, связано ли различие с особенностями выбранной модели, представлением параметров ячейки или ошибкой переноса данных. Поэтому утверждение о том, что оба образца однозначно имеют идентичный тип каркаса и различаются исключительно катионным составом, на данном этапе следует формулировать осторожно. Сходство основных дифракционных максимумов поддерживает гипотезу о сохранении значительной части исходной кристаллической структуры, однако окончательное подтверждение требует проверки фазовой модели и параметров элементарной ячейки.

Обсуждение результатов XRD

Результаты рентгенофазового анализа показывают, что в обоих образцах сохраняются выраженные дифракционные особенности, характерные для кристаллических алюмосиликатных материалов. Различия в форме и интенсивности пиков могут отражать изменения состояния образцов после модифицирования, но не позволяют отдельно определить вклад каждого фактора. Для более строгого анализа необходимо повторно обработать исходные дифрактограммы с одинаковыми параметрами фона, диапазона углов и модели фаз. Дополнительно желательно привести рентгеновскую длину волны, использованную при измерении, и уточнить способ определения массовых долей фаз. Это позволит проверить согласованность положения пиков с заявленными типами цеолитов и избежать чрезмерно категоричных выводов. Таким образом, результаты XRD

поддерживают вывод о сохранении кристаллической составляющей в цинксодержащем образце. Однако вопрос о полном соответствии кристаллических каркасов Na- и Zn-образцов требует дополнительной верификации.

Результаты ИК-Фурье-спектроскопии

Основные полосы поглощения. ИК-Фурье-спектроскопия позволяет исследовать колебания связей в алюмосиликатном каркасе, а также особенности присутствия адсорбированной и структурированной воды. В предоставленных спектрах натриевого и цинксодержащего образцов наблюдаются основные полосы, соответствующие колебаниям O–H, деформационным колебаниям молекул воды и колебаниям связей в каркасе.

Таблица 2. Сравнение основных полос FTIR-спектров

Область, см⁻¹	Na, см⁻¹	Zn, см⁻¹	Предварительная интерпретация
3700–3000	3373	3358	Валентные колебания O–H воды и гидроксильных групп
1800–1550	1641	1641	Деформационные колебания H–O–H
1250–850	989	991	Асимметричные колебания связей T–O–T, T = Si, Al
850–650	около 652	около 652	Колебания T–O и структурных колец
650–500	около 501	около 501	Колебания структурных единиц каркаса
500–410	около 411	около 411	Деформационные колебания каркасных связей

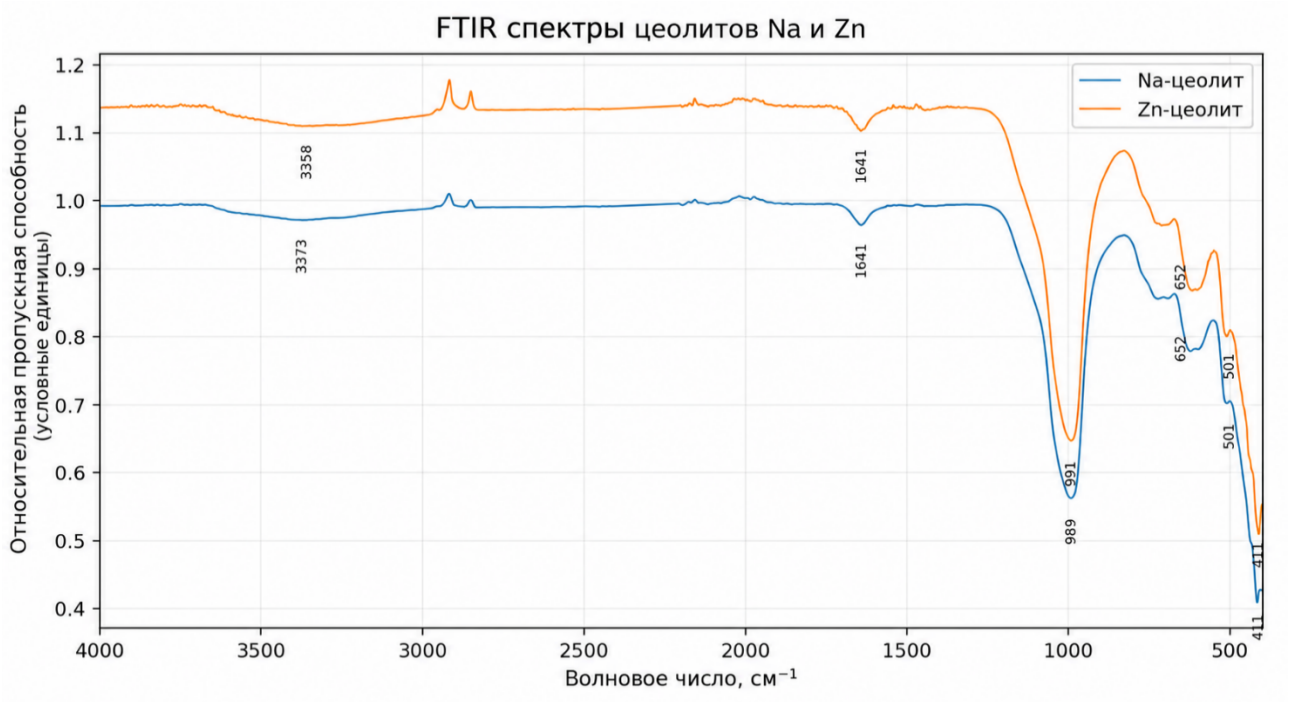


Рисунок 2. ИК-Фурье-спектры натриевой и цинксодержащей форм цеолита

Изменения в области O–H и H–O–H. В области валентных колебаний O–H максимум для натриевого образца отмечен при 3373 $см^{-1}$, а для цинксодержащего — при 3358 $см^{-1}$. Таким образом, наблюдается смещение приблизительно на 15 $см^{-1}$ в сторону меньших волновых чисел. Подобное смещение может быть связано с изменением водородных связей, локального окружения молекул воды и взаимодействия воды с компенсирующими катионами. Однако положение широкой полосы O–H зависит не только от природы катиона, но и от количества воды, её распределения и условий предварительной обработки. Поэтому наблюдаемое изменение следует интерпретировать как признак различия локального гидратационного окружения двух образцов, а не как однозначное доказательство конкретного механизма взаимодействия. Полоса около 1641 $см^{-1}$ присутствует в обоих спектрах и связывается с деформационными колебаниями H–O–H. Сохранение этой особенности согласуется с присутствием воды в обоих образцах на момент спектроскопического измерения.

Колебания алюмосиликатного каркаса

Основная полоса в области каркасных колебаний смещается с 989 $см^{-1}$ для Na-образца до 991 $см^{-1}$ для Zn-образца. Разница составляет около 2 $см^{-1}$, что указывает на близость положения соответствующих спектральных особенностей. Незначительное смещение может быть связано с изменением локального электрического окружения каркасных атомов, катионным составом, гидратацией или погрешностью определения максимума полосы. Сохранение основных полос в областях около 652, 501 и 411 $см^{-1}$ также согласуется с наличием алюмосиликатного каркаса в обоих образцах. В области около 2397 $см^{-1}$ в спектре Zn отмечена небольшая особенность. Без дополнительных контрольных измерений её не следует приписывать новой структурной группе цеолита. Возможными причинами являются атмосферный углекислый газ, особенности фоновой коррекции или оптического пути.

Выводы по FTIR. Сравнение ИК-спектров показывает, что основные полосы, связанные с алюмосиликатным каркасом, сохраняются после введения цинка. Наиболее заметное из указанных смещений относится к области O–H, тогда как полоса каркасных колебаний изменяется незначительно. Совокупность этих наблюдений согласуется с изменением локального окружения катионов и молекул воды при сохранении основных спектральных признаков цеолитной структуры. Для более детального анализа желательно использовать исходные цифровые спектры, одинаковую процедуру коррекции фона и нормирования, а также данные о влажности и предварительной обработке образцов.

Заключение

На основании сравнительного анализа натриевой и цинксодержащей форм цеолита получены следующие выводы.

1. Кристаллическая структура. В дифрактограммах обоих образцов сохраняются характерные максимумы, что свидетельствует о наличии кристаллической составляющей. При этом фазовый состав и параметры решётки, приведённые в исходном отчёте, требуют дополнительной проверки для окончательного подтверждения идентичности каркасов.

2. ИК-спектроскопия. Основные полосы алюмосиликатного каркаса сохраняются. Полоса O–H смещается с 3373 до 3358 $см^{-1}$, а полоса каркасных колебаний — с 989 до 991 $см^{-1}$. Это согласуется с изменением локального окружения молекул воды и катионов при сохранении основных спектральных признаков цеолита.

3. Удельная поверхность. По многоточечному методу BET поверхность увеличивается с 12,681 $м^2/г$ для Na до 21,633 $м^2/г$ для Zn, что соответствует приросту приблизительно 70,6 %.

4. Микропористость. Площадь микропористой поверхности по t-методу увеличивается с 3,513 до 13,797 $м^2/г$, а объём микропор — с 0,001628 до 0,006612 $см^3/г$. Одновременно уменьшается расчётная внешняя поверхность и изменяются показатели BJH и DFT, указывая на различия в распределении доступных пор.

Таким образом, основной количественный результат работы состоит в том, что исследованный цинксодержащий образец характеризуется более высокой удельной поверхностью и существенно большим расчётным вкладом микропористости по сравнению с натриевым образцом. Эти характеристики представляют интерес для последующего изучения адсорбционных и каталитических свойств материалов. При этом оценка практической эффективности требует отдельных испытаний на адсорбционную ёмкость, селективность, каталитическую активность и стабильность в конкретных рабочих условиях.

Список литературы

1. Ли С.Х., Ким С.Й., Алмейда Ж.Н., Руис-Мартинес Х., Со М.-Г., Чун С.-Х., Ли Б.Дж., Ли К.-Й. Lee, S-H., Kim, S.Y., Almeida, J.N., Ruiz-Martínez, J., Seo, M-G., Chung, S-H., Lee, B.J., & Lee, K-Y. (2026). Structure-guided control of Al sites in MFI zeolites: Toward rational catalyst design for efficient methane dehydroaromatization. Chemical Engineering Journal, 528, 172228 // Chemical Engineering Journal. – 2026. – Т. 528. – DOI: 10.1016/j.cej.2025.172228.
2. Al-Sayoud, A., Alyousef, Z., Aizaz, U., Ahmad, M.H., Alasseel, A. & Al-Shafei, E. (2026). Cobalt-based catalysts on 13X zeolite for efficient ammonia cracking to hydrogen. Fuel, 424, 139358. – DOI: 10.1016/j.fuel.2026.139358.
3. Aliyu, A., Lee, J. & Harvey, A. Comparative life cycle assessment (LCA) of Chlorella vulgaris bio-oil production: assessing the environmental performance of sulfated zirconia vs. zeolite Y catalysts. Green Carbon. – 2026. – DOI: 10.1016/j.greenca.2026.01.006.
4. Bish D.L., Howard S.A. Quantitative phase analysis using the Rietveld method // Journal of Applied Crystallography. – 1988. – Т. 21. – P. 86–91. – DOI: 10.1107/S0021889887009415.
5. Breck, D.W. Zeolite Molecular Sieves: Structure, Chemistry, and Use / D.W. Breck. – New York: John Wiley & Sons, 1974. – 771 P.
6. Coates J. Interpretation of Infrared Spectra, A Practical Approach. In: Meyers R.A. (ed.). Encyclopedia of Analytical Chemistry. P. 10815–10837. – Chichester: John Wiley & Sons, 2000. – DOI: 10.1002/9780470027318.a5606.
7. International Organization for Standardization. ISO 9277:2022. Determination of the specific surface area of solids by gas adsorption – BET method. – Geneva: ISO, 2022. – 22 P.

8. International Organization for Standardization. ISO 13320:2020. Particle size analysis – Laser diffraction methods. – Geneva: ISO, 2020. – 59 P.
9. Sing K.S.W., Everett D.H., Haul R.A.W., Moscou L., Pierotti R.A., Rouquerol J., Siemieniewska T. Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity. Pure and Applied Chemistry. 1985. Vol. 57, No. 4. P. 603–619. DOI: 10.1351/pac198557040603.
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. Ли С.Х., Ким С.Й., Алмейда Ж.Н., Руис-Мартинес Х., Со М.-Г., Чун С.-Х., Ли Б.Дж., Ли К.-Й. [Lee, S-H., Kim, S.Y., Almeida, J.N., Ruiz-Martínez, J., Seo, M-G., Chung, S-H., Lee, B.J., & Lee, K-Y. (2026). Structure-guided control of Al sites in MFI zeolites: Toward rational catalyst design for efficient methane dehydroaromatization. Chemical Engineering Journal, 528, 172228] // Chemical Engineering Journal. – 2026. – Vol. 528. – DOI: 10.1016/j.cej. 2025.172228. (In Russ.).
2. Al-Sayoud, A., Alyousef, Z., Aizaz, U., Ahmad M.H., Alasseel, A. & Al-Shafei, E. Cobalt-based catalysts on 13X zeolite for efficient ammonia cracking to hydrogen. Fuel, 424, 139358. – 2026. – DOI: 10.1016/j.fuel.2026.139358.
3. Aliyu, A., Lee, J. & Harvey, A. Comparative life cycle assessment (LCA) of Chlorella vulgaris bio-oil production: assessing the environmental performance of sulfated zirconia vs. zeolite Y catalysts. Green Carbon. – 2026. – DOI: 10.1016/j.greenca.2026.01.006.
4. Bish D.L., Howard S.A. Quantitative phase analysis using the Rietveld method // Journal of Applied Crystallography. – 1988. – Vol. 21. – P. 86–91. – DOI: 10.1107/S0021889887009415.
5. Breck D.W. Zeolite Molecular Sieves: Structure, Chemistry, and Use. – New York: John Wiley & Sons, 1974.
6. Coates J. Interpretation of Infrared Spectra, A Practical Approach. In: Meyers R.A. (ed.). Encyclopedia of Analytical Chemistry. P. 10815–10837. – Chichester: John Wiley & Sons, 2000. – DOI: 10.1002/9780470027318.a5606.
7. International Organization for Standardization. ISO 9277:2022. Determination of the specific surface area of solids by gas adsorption – BET method. – Geneva: ISO, 2022.
8. International Organization for Standardization. ISO 13320:2020. Particle size analysis – Laser diffraction methods. – Geneva: ISO, 2020.
9. Sing K.S.W., Everett D.H., Haul R.A.W., Moscou L., Pierotti R.A., Rouquerol J., Siemieniewska T. Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity. Pure and Applied Chemistry. 1985. Vol. 57, No. 4. P. 603–619. DOI: 10.1351/pac198557040603.

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: 01.10.2026
Статья принята к публикации: 12.10.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 664.854:664.844

Системно-смысловой анализ физико-химических и межфазных энерго- и массообменных процессов при переработке плодов и овощей

Курбанова Мадина Джамшедовна
PhD, ст. преп
Ташкентский государственный аграрный университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: madinaqurbonova@mail.ru

Курбанов Жамшед Мажидович
д-р техн. наук, проф.
Самаркандский институт экономики и сервиса
Республика Узбекистан, г. Самарканд

Додаев Кучкор Одилович
д-р техн. наук, проф.
Ташкентский химико-технологический институт
Республика Узбекистан, г. Ташкент

System-semantic analysis of physicochemical and interfacial energy and mass transfer processes in fruit and vegetable processing

Kurbanova Madina Dzhamshidovna
PhD, Senior Lecturer
Tashkent State Agrarian University
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Kurbanov Dzhamshid Majidovich
doctor of Technical Sciences, Professor
Samarkand Institute of Economics and Service
Republic of Uzbekistan, Samarkand

Dodaev Kuchkor Odilovich
doctor of Technical Sciences, Professor
Tashkent Institute of Chemical Technology
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

Цель исследования — систематизировать взаимосвязи физико-химических, межфазных, энергетических и массопереносных явлений, формирующих структуру процесса тепловой обработки и сушки плодоовощного сырья, и представить их в виде структурной схемы третьего уровня иерархии системно-смыслового анализа. Методологическую основу

Библиографическое описание: Курбанова М.Д., Курбанов Ж.М., Додаев К.О. Системно-смысловой анализ физико-химических и межфазных энерго- и массообменных процессов при переработке плодов и овощей // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23534

составили многоуровневый системно-смысловой анализ, элементы топологии и теории ориентированных графов, а также причинно-следственная декомпозиция процессов переноса энергии и массы. В качестве ключевых переменных рассмотрены поля температуры, влагосодержания и давления, изменение поверхностного напряжения, положение зоны испарения, усадка и деформационные состояния материала. Показано, что перенос энергии и влаги во влажной и сухой фазах образует систему прямых и обратных связей, а изменение физико-химических свойств материала влияет одновременно на интенсивность переноса, локализацию зоны испарения и развитие структурно-механических деформаций. Уточнена последовательность переходов от вязкопластического состояния к пластическому, упругопластическому и упругому, а также связь этих переходов с образованием микро-, локальных и сквозных трещин. Разработанная схема может использоваться как концептуальная основа для постановки математических моделей, выбора существенных параметров эксперимента и проектирования процессов сушки плодов и овощей с учетом сохранения структуры и качества продукта.

Abstract

The aim of the study is to systematize the relationships among physicochemical, interfacial, energy-transfer and mass-transfer phenomena that determine thermal processing and drying of fruit and vegetable materials, and to represent them as a third-level hierarchical structural scheme of system-semantic analysis. The methodology combines multilevel system-semantic analysis, elements of topology and directed graph theory, and cause-and-effect decomposition of heat and mass transfer. Temperature, moisture-content and pressure fields, changes in surface tension, the position of the evaporation zone, shrinkage and deformation states were considered as key variables. The analysis shows that energy and moisture transfer in the wet and dry phases form a network of direct and feedback relationships, while changes in physicochemical properties simultaneously affect transfer intensity, evaporation-zone localization and structural-mechanical deformation. The sequence of transitions from viscoplastic to plastic, elastoplastic and elastic behavior was clarified, together with its relationship to the formation of microcracks, local cracks and through-cracks. The proposed structural scheme can serve as a conceptual basis for selecting significant model variables, formulating mathematical models and planning experimental studies and drying equipment aimed at preserving product structure and quality.

Ключевые слова: системно-смысловой анализ, сушка, плоды и овощи, тепломассоперенос, структурная схема, деформация, зона испарения.

Keywords: system-semantic analysis, drying, fruits and vegetables, heat and mass transfer, structural scheme, deformation, evaporation zone.

Введение

Сушка плодов и овощей представляет собой не отдельный акт удаления влаги, а совокупность взаимосвязанных теплофизических, массообменных, структурно-механических и фазовых явлений. Современные исследования рассматривают сушку растительного сырья как нестационарный сопряженный процесс переноса теплоты и влаги, в котором изменение температуры, влажности, давления и структуры материала взаимно

влияет на скорость обезвоживания и качество готового продукта [4, 7, 10]. Для пористых пищевых материалов особенно значимы внутренний перенос влаги, испарение на поверхности и внутри тела, деформация, усадка и формирование поровой структуры [3, 11].

При усложнении способов энергоподвода — использовании инфракрасного, микроволнового, ультразвукового, электрополевого и комбинированного воздействия — количество взаимодействующих факторов возрастает. В таких условиях локальное рассмотрение отдельных кинетических зависимостей не всегда позволяет установить причинно-следственные связи между изменением состояния материала и переносными процессами. Системный подход дает возможность представить объект как иерархию взаимосвязанных элементов и выделить наиболее существенные связи для последующего моделирования [1, 5].

В ранее выполненной работе авторов по экспериментальному исследованию сушки плодов и овощей с применением электрофизических методов были сформулированы предпосылки для перехода от описания отдельных параметров процесса к их системной интерпретации [2]. В настоящем исследовании внимание сосредоточено на третьем уровне иерархии, где совместно рассматриваются перенос энергии и массы, поля состояния, положение зоны испарения, усадка и деформационные превращения материала.

Цель исследования — разработать структурное представление физико-химических и межфазных энерго- и массообменных процессов при тепловой обработке плодоовощного сырья и определить причинно-следственные связи между переносом энергии и массы, изменением полей состояния, усадкой и деформацией материала. Для достижения цели решались задачи: выделение ключевых элементов третьего уровня иерархии; установление направлений прямых и обратных связей между ними; систематизация деформационных состояний при сушке; формирование предпосылок для дальнейшей математической формализации процесса.

Материалы и методы

Объектом системного рассмотрения служили процессы тепловой обработки и сушки влажных плодоовощных материалов как многофазных коллоидно-пористых систем. Исходное представление включает влажную фазу и сухую матрицу, между которыми при подводе энергии происходят перенос теплоты, миграция влаги, испарение и изменение структурно-механических свойств. Методическая схема исследования основана на системно-смысловом анализе, при котором сложный процесс декомпозируется на функциональные элементы и связи, а затем объединяется в ориентированный граф [1, 5].

В качестве узлов структурной схемы использованы: перенос энергии (ПЭ), перенос массы (ПМ), поля температуры T, влагосодержания U и давления P, поверхностное напряжение σ, зона испарения (ЗИ), усадка, деформация, а также последовательные структурно-механические состояния материала. Направленные дуги отражают причинно-следственное воздействие одного элемента на другой. Обратные связи используются для описания влияния изменения свойств фаз и деформации на интенсивность переноса энергии и массы.

При интерпретации схемы учитывались современные представления о сопряженном тепломассопереносе в пищевых и растительных материалах. Согласно литературным данным, процесс сушки сопровождается сменой доминирующих механизмов влагопереноса, а усадка влияет на эффективные коэффициенты переноса и на геометрию области расчета [3, 8, 11]. Для оценки актуальности выбранных связей выполнено сопоставление структурной схемы с современными обзорами по сушке плодов и овощей, комбинированным способам энергоподвода и оценке качества сушеной продукции [3, 4, 6, 8–12].

Метод исследования носит концептуально-аналитический характер: количественная идентификация коэффициентов модели и экспериментальная верификация отдельных дуг графа не входили в задачи данной работы. Полученная схема рассматривается как основа для последующего выбора измеряемых переменных, построения уравнений состояния и переноса и постановки факторных экспериментов.

Результаты и обсуждение

Влажный плодоовощной материал целесообразно рассматривать как систему, в которой влажная и сухая фазы изменяются одновременно. При сушке протекают два базовых процесса: перенос энергии, обеспечивающий нагрев материала и фазовое превращение влаги, и перенос массы, включающий перемещение влаги внутри материала и ее удаление во внешнюю среду. Основными движущими факторами выступают пространственно-временные неоднородности температуры T, влагосодержания U и давления P. Несоответствие между скоростью испарения влаги с поверхности и скоростью ее подвода из внутренних слоев приводит к перемещению и углублению зоны испарения.

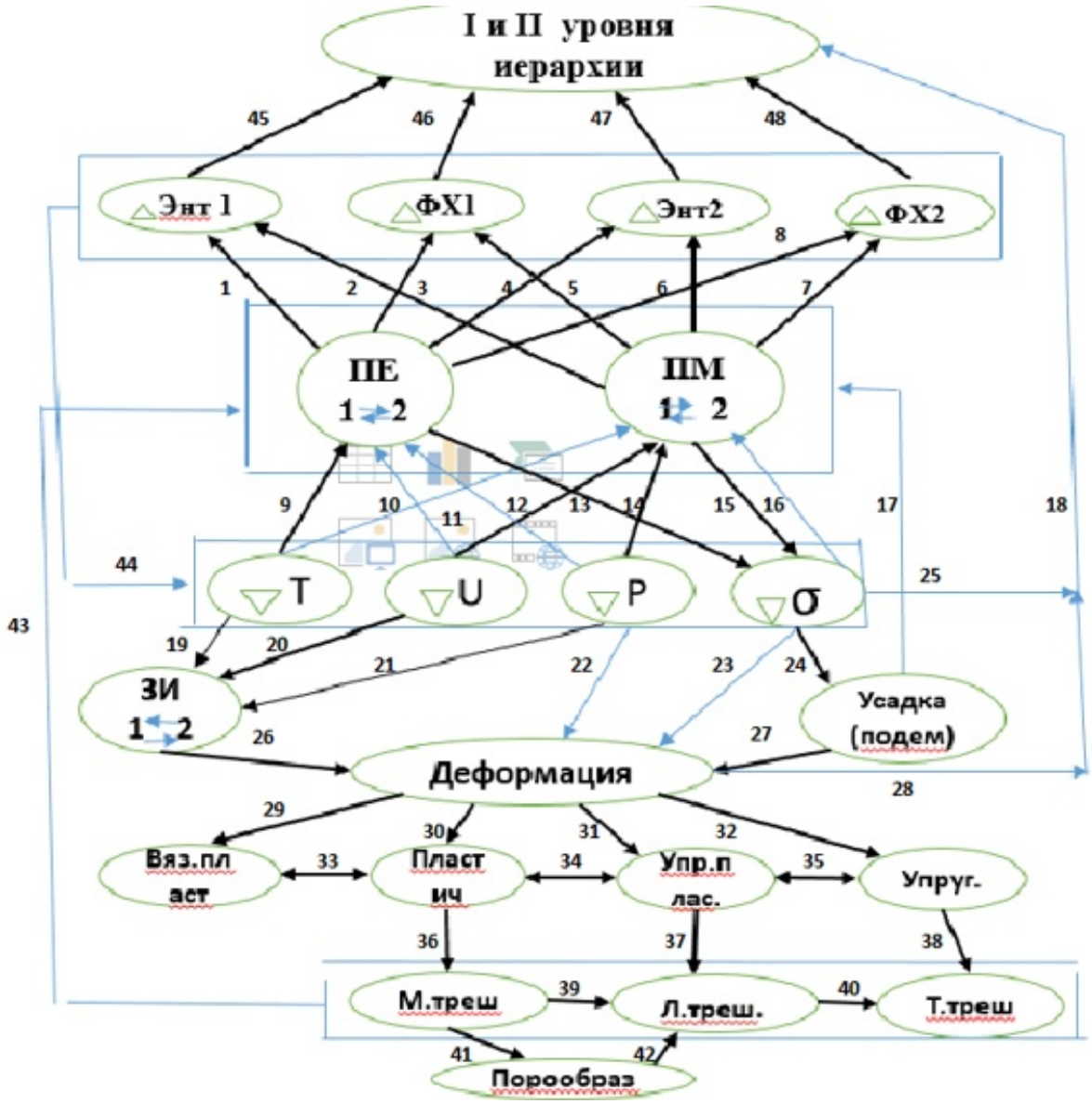


Рисунок 1. Структурная схема физико-химических эффектов третьего уровня иерархии системно-смыслового анализа плодов и овощей

Как видно из рис. 1, каждый вид неравномерности прежде всего вызывает перенос соответствующей субстанции и одновременно оказывает перекрестное влияние на другие переносные процессы. Температурный градиент определяет теплоперенос, градиент влагосодержания связан с перемещением влаги, а изменение давления может усиливать перенос паровой фазы. В реальном пищевом материале эти механизмы протекают совместно, поэтому их раздельное математическое описание должно дополняться условиями сопряжения. Современные модели сушки пористых материалов также исходят из взаимосвязанности полей температуры и влаги и необходимости учитывать изменение геометрии при усадке [3, 11].

Потоки энергии и массы изменяют энтальпию и физико-химические характеристики влажной и сухой фаз. К таким характеристикам относятся плотность, вязкость, теплоемкость, пористость, температуропроводность и теплопроводность. В структурной схеме их изменение связано обратными дугами с переносом энергии и массы. Это принципиально

важно, поскольку свойства материала в ходе сушки не являются постоянными: уменьшение влагосодержания изменяет поровую структуру и сопротивление внутреннему массопереносу, а температурное воздействие влияет на состояние клеточных и полимерных компонентов.

Перенос энергии и массы нарушает локальное равновесие на межфазной границе и сопровождается изменением поверхностного напряжения. Возникающие нормальные и касательные напряжения способны изменять форму и внутреннюю структуру материала. В зависимости от режима сушки это проявляется как усадка или более сложная деформация. Усадка, в свою очередь, изменяет длину диффузионного пути, площадь поверхности и пористость, формируя обратное воздействие на переносные процессы. Роль усадки в механизме тепломассопереноса подтверждается моделями, в которых изменение размеров образца непосредственно учитывается в уравнениях переноса [11].

Зона испарения может располагаться на поверхности либо перемещаться внутрь материала. На начальном этапе при достаточном подводе влаги из внутренних слоев значительная часть испарения происходит вблизи поверхности. По мере снижения влагосодержания внутреннее сопротивление возрастает, и зона активного фазового превращения смещается в глубину. В структурной схеме это смещение связано с последующим развитием деформации и усадки. Такое представление согласуется с современным пониманием сушки как перехода от внешне контролируемого удаления влаги к режиму, в котором существенную роль играет внутренний массоперенос [7, 12].

Отдельный блок схемы отражает последовательность структурно-механических состояний. На ранних стадиях материал способен проявлять вязкопластическое поведение; затем возрастает доля пластических и упругопластических деформаций, а на поздних стадиях при существенном снижении влажности возрастает роль упругой составляющей. Микротрещины связываются преимущественно с пластическими деформациями, более крупные локальные трещины — с упругопластическим состоянием, а развитие сквозных трещин означает нарушение целостности структуры. Следовательно, задача оптимизации сушки должна включать не только сокращение времени обезвоживания, но и ограничение градиентов температуры и влагосодержания, вызывающих критические механические напряжения.

Современные способы интенсификации сушки — ультразвуковая, инфракрасная, микроволновая и электродинамическая обработка — направлены прежде всего на изменение условий подвода энергии или снижение сопротивления влагопереносу [6, 8, 12, 9]. Однако усиление энергоподвода может создавать локальную неравномерность температуры и повышать риск структурных повреждений. Поэтому предложенная структурная схема полезна как средство предварительного анализа: при включении нового физического воздействия можно определить, на какие узлы третьего уровня оно действует непосредственно и какие вторичные эффекты возникают через цепочки связей.

Практическая ценность системно-смыслового представления заключается в возможности перейти от качественной схемы к математической модели. Для этого узлам графа могут быть сопоставлены измеряемые переменные, а дугам — функциональные зависимости или коэффициенты чувствительности. Поля T, U и P могут быть описаны дифференциальными уравнениями переноса, усадка — функцией локального

влагосодержания и температуры, а переходы между деформационными состояниями — реологическими соотношениями. Такой порядок позволяет последовательно усложнять модель, сохраняя ее физическую интерпретируемость.

Заключение

Разработано структурное представление третьего уровня иерархии системно-смыслового анализа процессов тепловой обработки и сушки плодоовощного сырья. В единой схеме объединены перенос энергии и массы, поля температуры, влагосодержания и давления, изменение поверхностного напряжения, положение зоны испарения, усадка и последовательность деформационных состояний материала.

Установлено, что ключевой особенностью рассматриваемой системы является наличие прямых и обратных связей: перенос энергии и массы изменяет свойства фаз и структуру материала, а структурные изменения, в свою очередь, влияют на условия дальнейшего тепломассопереноса. Углубление зоны испарения и рост внутренних градиентов связаны с развитием усадки и деформации; переход от вязкопластического к пластическому, упругопластическому и упругому состоянию сопровождается повышением риска образования микро-, локальных и сквозных трещин.

Предложенная схема может использоваться для конкретизации задач исследования, выбора контролируемых параметров и факторов, разработки сопряженных математических моделей и обоснования режимов сушки, ориентированных на минимизацию усадки и разрушения структуры при сохранении требуемой интенсивности обезвоживания. Следующим этапом целесообразно считать количественную идентификацию наиболее значимых связей и экспериментальную проверку модели для конкретных видов плодов и овощей.

Список литературы

1. Кафаров В.В., Дорохов И.Н. Системный анализ процессов химической технологии. Основы стратегии. – М.: Наука, 1976. – 500 с.
2. Курбанова М.Ж. Экспериментальное исследование процесса сушки плодов и овощей с применением электрофизических методов: монография. – Ташкент: Ташкентский государственный аграрный университет, 2025. – 140 с.
3. An J., Xie H., Yan J., Wei H., Wu Y., Liao X. A review of applications of energy analysis: Grain, fruit and vegetable drying technology // Energy Reports. – 2024. – Т. 12. – P. 5482–5506. – DOI: 10.1016/j.egyr.2024.11.037.
4. Bhattacharjee S., Mohanty P., Sahu J.K., Sahu J.N. A critical review on drying of food materials: Recent progress and key challenges // International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2024. – Т. 158. – Art. 107863. – DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.107863.
5. Harary F. Graph Theory. – Reading, MA: Addison-Wesley. – 1969. – 274 P.
6. Iranshahi K., Onwude D.I., Martynenko A., Defraeye T. Dehydration mechanisms in electrohydrodynamic drying of plant-based foods // Food and Bioproducts Processing. – 2022. – Т. 131. – P. 202–216. – DOI: 10.1016/j.fbp.2021.11.009.

7. Kumar C., Karim M.A., Joardder M.U.H. Intermittent drying of food products: A critical review // Journal of Food Engineering. – 2014. – T. 121. – P. 48–57. – DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2013.08.014.
8. Mohammed A.N., Chauhan O.P., Semwal A.D. Emerging technologies for fruits and vegetables dehydration // Food and Humanity. – 2024. – T. 2. – Art. 100303. – DOI: 10.1016/j.foohum.2024.100303.
9. Onwude D.I., Iranshahi K., Rubinetti D., Schudel S., Schemminger J., Martynenko A., Defraeye T. How much do process parameters affect the residual quality attributes of dried fruits and vegetables for convective drying? // Food and Bioproducts Processing. – 2022. – T. 131. – P. 176–190. – DOI: 10.1016/j.fbp.2021.11.005.
10. Reis F.R., Marques C. de Moraes A.C.S., Masson M.L. Trends in quality assessment and drying methods used for fruits and vegetables // Food Control. – 2022. – T. 142. – Art. 109254. – DOI: 10.1016/j.foodcont.2022.109254.
11. Tuly S.S., Joardder M.U.H., Welsh Z.G., Karim A. Mathematical modelling of heat and mass transfer during jackfruit drying considering shrinkage // Energies. – 2023. – T. 16, № 11. – Art. 4461. – DOI: 10.3390/en16114461.
12. Xu B., Tiliwa E.S., Yan W., Azam S.M.R., Wei B., Zhou C., Ma H., Bhandari B. Recent development in high quality drying of fruits and vegetables assisted by ultrasound: A review // Food Research International. – 2022. – T. 152. – Art. 110744. – DOI: 10.1016/j.foodres.2021.110744.

References

1. Kafarov V.V., Dorokhov I.N. Sistemnyi analiz protsessov khimicheskoi tekhnologii. Osnovy strategii [System analysis of chemical engineering processes. Strategy fundamentals]. Moscow: Nauka, 1976. 500 P. (In Russ.).
2. Kurbanova M.Zh. Eksperimentalnoe issledovanie protsessa sushki plodov i ovoshchei s primeneniem elektrofizicheskikh metodov [Experimental study of fruit and vegetable drying using electrophysical methods]. Tashkent: Tashkent State Agrarian University, 2025. 140 P. (In Russ.).
3. An J., Xie H., Yan J., Wei H., Wu Y., Liao X. A review of applications of energy analysis: Grain, fruit and vegetable drying technology. Energy Reports, 2024, vol. 12, P. 5482–5506. DOI: 10.1016/j.egyr.2024.11.037.
4. Bhattacharjee S., Mohanty P., Sahu J.K., Sahu J.N. A critical review on drying of food materials: Recent progress and key challenges. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2024, vol. 158, 107863. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.107863.
5. Harary F. Graph Theory. Reading, MA: Addison-Wesley. – 1969. – 274 P.
6. 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.

7. Kumar C., Karim M.A., Joardder M.U.H. Intermittent drying of food products: A critical review // Journal of Food Engineering. – 2014. – P. 48–57. – DOI: 10.1016/j.jfoodeng. 2013.08.014.
8. Mohammed A.N., Chauhan O.P., Semwal A.D. Emerging technologies for fruits and vegetables dehydration. Food and Humanity, 2024, vol. 2, 100303. DOI: 10.1016/j.foohum.2024.100303.
9. Onwude D.I., Iranshahi K., Rubinetti D., Schudel S., Schemminger J., Martynenko A., Defraeye T. How much do process parameters affect the residual quality attributes of dried fruits and vegetables for convective drying? Food and Bioproducts Processing, 2022, vol. 131, P. 176–190. DOI: 10.1016/j.fbp.2021.11.005.
10. Reis F.R., Marques C., de Moraes A.C.S., Masson M.L. Trends in quality assessment and drying methods used for fruits and vegetables. Food Control, 2022, vol. 142, 109254. DOI: 10.1016/ j.foodcont.2022.109254.
11. Tuly S.S., Joardder M.U.H., Welsh Z.G., Karim A. Mathematical modelling of heat and mass transfer during jackfruit drying considering shrinkage. Energies, 2023, vol. 16, no. 11, 4461. DOI: 10.3390/en16114461.
12. Xu B., Tiliwa E.S., Yan W., Azam S.M.R., Wei B., Zhou C., Ma H., Bhandari B. Recent development in high quality drying of fruits and vegetables assisted by ultrasound: A review. Food Research International, 2022, vol. 152, 110744. DOI: 10.1016/j.foodres.2021.110744.

Статья поступила в редакцию: 08.09.2026
Статья принята к публикации: 14.09.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 678.544.32:631.67

Технологическое и квантово-химическое обоснование перспективной Na-КМЦ-композиции с виниловыми эфирами фруктовых кислот

Махмудова Махпурахон Хабибулло кизи
соискатель
Республика Узбекистан, г. Наманган
Солиев Махаммаджон Исматуллаевич
PhD, доц., проф.
кафедры химии, Наманганский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Наманган
Охундадаев Абдугани Комилжон угли
PhD, заведующий кафедрой
химической инженерии, Наманганский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Наманган
Сайпиев Турсунпулот Собитович
канд. техн. наук, доц.
кафедры химии, Наманганский государственный университет
Республика Узбекистан, г. Наманган

Technological and quantum-chemical rationale for a prospective Na-CMC composition with vinyl esters of fruit acids

Makhmudova Makhpurakhon Khabibullo kizi
RResearch degree applicant,
Uzbekistan, Namangan
Soliev Mahammadjon Ismatullaevich
PhD, Associate Professor, Professor
at the Department of Chemistry,
Namangan State Technical University,
Uzbekistan, Namangan
Okhundadaev Abdugani Komiljon ugli
PhD,
Head of the Department of Chemical Engineering,
Namangan State Technical University,
Uzbekistan, Namangan
Saypiev Tursunpulot Sobitovich
candidate of Technical Sciences, Associate Professor
at the Department of Chemistry, Namangan State University
Uzbekistan, Namangan

Библиографическое описание: Технологическое и квантово-химическое обоснование перспективной Na-КМЦ-композиции с виниловыми эфирами фруктовых кислот // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Махмудова М.Х. кизи [и др.]. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23403

Аннотация

Цель работы — обосновать перспективную композицию из натрий-карбоксиметилцеллюлозы (Na-КМЦ) и виниловых эфиров фруктовых кислот на основе экспериментальных и квантово-химических данных. Na-КМЦ получали из равных масс стеблей пшеницы, риса и арахиса водно-щелочной обработкой, пероксидным отбеливанием, мерсеризацией и реакцией с натриймонохлорацетатом. Степень замещения составила 0,85, степень полимеризации — 490, влажность — 9 %, pH 1,5 %-ного раствора — 9,1; содержание основного вещества — 49,9 %, растворимость — 98,6 % для сухого технического продукта. Для модельных моновиниловых эфиров яблочной, винной и лимонной кислот выполнен скрининговый расчёт B3LYP/STO-3G на MMFF94s-конформерах. Рассчитанные значения топологической полярной поверхности составили 83,83–121,13 Å², дипольного момента — 0,79–2,51 D, а HOMO–LUMO-разрыва — 5,68–6,02 эВ. Дескрипторы предсказывают усиление гидратации в ряду малат < тартрат < цитрат, тогда как различия электронной доступности умеренны. Для ди- и тривинильных модельных фракций получены разрывы 5,81 и 5,60 эВ, что поддерживает их рассмотрение как потенциальных узлов сетки; это не заменяет кинетического эксперимента. Предложено раздельное получение очищенной Na-КМЦ и мономера с последующим контролируе-мым совмещением. Функциональные свойства продукта, почвенная эффективность, биоразлагаемость и себестоимость требуют экспериментальной проверки.

Abstract

This study provides experimental and quantum-chemical support for a prospective composition of sodium carboxymethylcellulose (Na-CMC) and fruit-acid vinyl esters. Na-CMC was produced from equal masses of wheat, rice, and peanut stalks by aqueous alkaline treatment, peroxide bleaching, mercerization, and reaction with sodium monochloroacetate. The degree of substitution was 0.85, the degree of polymerization 490, moisture 9 %, and pH 9.1 for a 1.5 wt% solution; the dry technical product contained 49.9 % main substance and had 98.6 % water solubility. Screening calculations for model monovinyl esters of malic, tartaric, and citric acids used B3LYP/STO-3G single points on MMFF94s conformers. Topological polar surface areas were 83.83–121.13 Å², dipole moments 0.79–2.51 D, and HOMO–LUMO gaps 5.68–6.02 eV. The descriptors predict increasing hydration contribution from malate to tartrate to citrate, while electronic-accessibility differences are moderate. Di- and trivinyl model fractions gave gaps of 5.81 and 5.60 eV, supporting their consideration as potential network nodes; this does not replace kinetic experiments. Separate preparation of purified Na-CMC and the monomer with controlled mixing is proposed. Product functionality, soil performance, biodegradability, and cost remain to be tested.

Ключевые слова: натрий-карбоксиметилцеллюлоза, растительные остатки, виниловые эфиры фруктовых кислот, полимерная матрица, влагоудержание, технологическая схема.

Keywords: sodium carboxymethylcellulose, plant residues, fruit-acid vinyl esters, polymer matrix, water retention, process design.

Введение

Na-КМЦ из аграрных остатков рассматривается как альтернатива хлопковому продукту [2, 4–7]. Целлюлозные гидрогели изучают для водосбережения [1, 3, 10], а виниловые эфиры яблочной, винной и лимонной кислот [9] — потенциальные компоненты новых композиций. Цель работы — оценить смешанную Na-КМЦ как матрицу и определить контрольные стадии будущей технологии.

Материалы и методы

Равные массы стеблей пшеницы, риса и арахиса измельчали до 10–15 мм; водная обработка — 2 ч, гидромодуль 1:20; варка — 2 %-ный NaOH, 2 ч. Выход сухой массы до отбеливания — 45 %. Отбеливание: 5–6 %-ный H_2O_2, слабощелочная среда, 80 °C, 40 мин; затем промывка до нейтральной реакции.

Высушенную целлюлозу (1 г) мерсеризовали в 20 мл 22 %-ного NaOH: 20–30 °C, 60 мин. После отжима до трёхкратной исходной массы вводили 1,9 моль натриймонохлорацетата на моль ангидроглюкозных звеньев. Механохимическая обработка: 60 мин, начальная температура 20–22 °C, конечная 33 °C; созревание: 70–80 °C, 30 мин; сушка: 95–100 °C. Степень замещения определяли через медную форму и иодометрическое титрование; структуру исследовали ИК-спектроскопией и рентгенографией. Повторность и погрешности исходной серии не указаны; статистические различия не оценивались.

Результаты и обсуждение

Квантово-химический скрининг модельных виниловых эфиров

Молекулярные структуры задавали SMILES; для каждой структуры выбирали MMFF94s-конформер (RDKit ETKDGv3), затем выполняли расчёт одной точки B3LYP/STO-3G в PySCF 2.14. Определяли топологическую полярную поверхность (TPSA), число доноров и акцепторов водородной связи, дипольный момент и энергии граничных орбиталей. Такой уровень является скрининговым: он позволяет сравнить молекулярный вклад компонентов, но не даёт количественной константы сополимеризации или готового свойства гра-нулы. Результаты для модельных моновиниловых эфиров приведены в табл. 1.

Таблица 1. Расчётные дескрипторы модельных моновиниловых эфиров

Модель	TPSA, Å²	HOMO–LUMO, эВ	μ, D
Малат	83,83	6,01	1,15
Тартрат	104,06	5,68	0,79
Цитрат	121,13	6,02	2,51

Расчёт: B3LYP/STO-3G, одна точка на MMFF94s-конформере; значения являются сравнительным скринингом.

TPSA возрастает от 83,83 Å² для малата до 121,13 Å² для цитрата; число доноров/акцепторов изменяется от 2/4 до 3/5. Поэтому расчёт предсказывает повышение вклада полярных групп и гидратации в ряду малат < тартрат < цитрат. Наименьший HOMO–LUMO-

разрыв получен для тартрата (5,68 эВ), а для малата и цитрата — 6,01 и 6,02 эВ; различие следует трактовать как относительный электронный дескриптор, а не как прогноз выхода. Дипольные моменты чувствительны к конформации и использованы только вместе с TPSA.

Для проверки сеткообразующей гипотезы дополнительно рассмотрены ди-винилтартрат и три-винилцитрат: рассчитанные разрывы составили 5,81 и 5,60 эВ соответственно. Наличие двух или трёх винильных групп делает эти модели потенциальными узлами, но сам расчёт не доказывает полимеризацию. Экспериментально должны быть установлены гель-фракция, конверсия двойных связей, остаточный мономер и удержание Na-КМЦ.

Экспериментальные показатели Na-КМЦ и технологическая схема

Получено 2,87 г беловатого технического порошка: влажность 9 %, степень замещения 0,85, степень полимеризации 490, pH 1,5 %-ного раствора 9,1. Основное вещество — 49,9 %, растворимость — 98,6 % в пересчёте на сухой технический продукт. Масса порошка не равна выходу чистого полимера; растворимость включает вклад примесей. Их состав требует уточнения: считать всю сопутствующую фракцию солями нельзя.

ИК-полосы 1595,9–1599,4, 1410,6 и 1058,7 $см^{-1}$ согласуются с карбоксилатными и эфирными фрагментами [8]. Изменения дифрактограммы без разделения фаз и расчёта индекса кристалличности не доказывают аморфизацию. Эти данные обосновывают испытание матрицы, но не подтверждают гидрогель.

Технология предусматривает очистку Na-КМЦ и отдельное получение мономера, затем совмещение потоков, сеткообразование, промывку, обезвоживание, сушку и классификацию гранул. Контролируют влажность и остаточный лигнин целлюлозы; сухой остаток, pH, степень замещения и вязкость Na-КМЦ; винильную функциональность, кислотное число, воду и растворитель мономера. Расчётные дескрипторы подсказывают, что цитратная фракция даст больший полярный вклад, а многофункциональные фракции — больше потенциальных узлов. При pH 9,1 обязательна проверка совместимости компонентов. Ацетиленовый модуль [9] требует самостоятельного регламента безопасности.

Радикальное формирование привитой или полувзаимопроникающей сетки остаётся гипотезой. Моновинильный компонент сам по себе не обеспечивает сшивание, а Na-КМЦ не содержит винильных групп. Нужны контроль многофункциональности, экстракция, определение гель-фракции, остаточного мономера и удержания Na-КМЦ. Исчезновение винильных сигналов не доказывает ковалентную прививку.

Набухание оценивают как $Q_t = (m_t - m_0)/m_0$, г/г: m_0 — масса сухого промытого геля, m_t — после набухания и удаления поверхностной воды по единому протоколу. Планируются солевые среды, повторные циклы, гранулометрия, влажность почвы, электропроводность вытяжки и прорастание относительно контроля [1, 3, 9]. Контролируемое действие означает предполагаемую регуляцию водопоглощения и влагоотдачи; она ещё не исследована.

Резервы удешевления — аграрное сырьё, водная переработка и исключение промежуточной сушки с пересчётом NaOH по влажности. Очистка должна ограничивать потери растворимой Na-КМЦ; простая водная промывка не гарантирует обессоливания. Эффект требует баланса реагентов, воды, растворителей и энергии.

Заключение

Полученная Na-КМЦ со степенью замещения 0,85 и степенью полимеризации 490 пригодна как кандидатная водная матрица после очистки. Квантово-химический скрининг трёх моновиниловых эфиров предсказывает рост полярного вклада в ряду малат < тартрат < цитрат; модели ди- и триэфиров указывают на потенциальную многофункциональность. Раздельная подготовка компонентов и контролируемое совмещение образуют проверяемую технологическую гипотезу.

Список литературы

1. Abg Ahmad D.F.B. et al. Eco-friendly cellulose hydrogels as controlled release fertilizer for enhanced growth and yield of upland rice // Sci. Rep. – 2023. – T. 13. – Art. 20453. – DOI: 10.1038/s41598-023-47922-y.
2. Adinugraha M.P., Marseno D.W. Haryadi. Synthesis and characterization of sodium carboxymethylcellulose from cavendish banana pseudo stem (Musa cavendishii Lambert) // Carbohydr. Polym. – 2005. – T. 62, № 2. – P. 164–169. – DOI: 10.1016/j.carbpol.2005.07.019.
3. Barala P., Lohchab M., Hooda V. Carboxymethyl cellulose-based composite hydrogels for sustainable agriculture under drought stress // Polym. Adv. Technol. – 2025. – T. 36, № 1. – DOI: 10.1002/pat.70046.
4. Barba C. et al. Synthesis and characterization of carboxymethylcelluloses (CMC) from non-wood fibers. I. Accessibility of cellulose fibers and CMC synthesis // Cellulose. – 2002. – T. 9. – P. 319–326. – DOI: 10.1023/A:1021184509189.
5. Hastuti N. et al. Facile synthesis of carboxymethyl cellulose (CMC) from agricultural residues // Cellulose Chem. Technol. – 2024. – T. 58, № 5. – P. 455–466. – DOI: 10.35812/CelluloseChemTechnol.2024.58.43.
6. Pushpamalar V. et al. Optimization of reaction conditions for preparing carboxymethyl cellulose from sago waste // Carbohydr. Polym. – 2006. – T. 64, № 2. – P. 312–318. – DOI: 10.1016/j.carbpol.2005.12.003.
7. Rodsamran P., Sothornvit R. Carboxymethyl cellulose from rice stubble waste // Songklanakarin J. Sci. Technol. – 2020. – T. 42, № 2. – P. 454–460. – DOI: 10.14456/sjst-psu.2020.59.
8. Zhang S. et al. Characterization of carboxymethyl cellulose made from bamboo harvesting residues // J. Renew. Mater. – 2022. – T. 10, № 12. – P. 3229–3241. – DOI: 10.32604/jrm.2022.020489.
9. Zyadeh M.T. et al. Synthesis of cellulose-based hydrogel for regulating the release of nitrogen fertilizer // Cellulose Chem. Technol. – 2023. – T. 57, № 1. – P. 71–78. – DOI: 10.35812/CelluloseChemTechnol.2023.57.07.

Статья поступила в редакцию: 01.10.2026
Статья принята к публикации: 09.10.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 544.723:546.87:546.284

DOI: 10.32743/UniTech.2026.151.10.23522

Синтез и физико-химические свойства мезопористого кремнезёма из рисовой шелухи, модифицированного оксидом висмута

Муратов Миртохир Мирхалил угли
докторант
Институт общей и неорганической химии АН РУз
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Мадримова Озода Шукурллаевна
соискатель
Институт общей и неорганической химии АН РУз
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Хошимов Шахром Мансуржон угли
докторант
Институт общей и неорганической химии АН РУз
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Эшметов Иззат Дусимбатович
д-р техн. наук, проф.
Институт общей и неорганической химии АН РУз
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: izzat.dusimbatovich@gmail.com
Маматалиев Нозим Нимаджонович
д-р хим. наук, гл. науч. сотр., Институт общей и неорганической химии АН РУз
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: mamataliyev@gmail.com

Synthesis and physicochemical properties of rice husk-derived mesoporous silica modified with bismuth oxide

Muratov Mirtokhir
Doctoral student
Institute of General and Inorganic Chemistry of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan
Republic of Uzbekistan, Tashkent
Madrimova Ozoda
Applicant, Institute of General and Inorganic Chemistry of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Библиографическое описание: Синтез и физико-химические свойства мезопористого кремнезёма из рисовой шелухи, модифицированного оксидом висмута // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Муратов М.М.У. [и др.]. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23522

Khoshimov Shakhrom
Doctoral student
Institute of General and Inorganic Chemistry of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan
Republic of Uzbekistan, Tashkent
Eshmetov Izzat
doctor of Technical Sciences, Professor
Institute of General and Inorganic Chemistry of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan
Republic of Uzbekistan, Tashkent
Mamataliev Nozim
doctor of Chemical Sciences, Chief Researcher
Institute of General and Inorganic Chemistry of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

Цель работы – получение мезопористого кремнезёма типа MCM-41 из рисовой шелухи и установление влияния содержания висмута на его структуру, состав и текстурные характеристики. Носитель синтезирован темплатным методом с использованием тетрадецилтриметиламмоний бромида (C_{14}TAB) и модифицирован висмутом (5–20 мас. % Bi) методом пропитки раствором $Bi(NO_3)_3 \cdot 5H_2O$ в разбавленной азотной кислоте с последующим прокаливанием при 400 °C. Образцы исследованы методами малоугловой и широкоугловой рентгеновской дифракции, ИК-спектроскопии, рентгенофлуоресцентного анализа, сканирующей электронной микроскопии с энергодисперсионным анализом (ЭДС) и низкотемпературной адсорбции азота. Исходный кремнезём имеет двумерную гексагональную мезоструктуру (p6mm) с параметром ячейки a_0 = 41,9 Å, удельную поверхность 909 м^2/г, объём пор 0,60 см^3/г и средний диаметр пор 2,6 нм. Висмут находится в рентгеноаморфном высокодисперсном оксидном состоянии; кристаллические фазы Bi_2O_3 не обнаружены. При 15–20 % Bi гексагональное упорядочение сохраняется, параметр a_0 уменьшается до 40,4 Å. Введение 5 и 10 % Bi снижает удельную поверхность до 578 и 456 м^2/г при неизменном диаметре пор, что обусловлено частичным блокированием каналов. По данным ЭДС фактическое содержание висмута близко к номинальному при 5–15 % Bi и составляет около 15 % при номинальных 20 %, что указывает на предельную ёмкость носителя по висмуту в условиях пропитки. Полученные результаты могут быть использованы при разработке сорбционных и каталитических материалов на основе отходов переработки риса.

Abstract

The aim of the work was to obtain MCM-41-type mesoporous silica from rice husk and to establish the effect of bismuth content on its structure, composition and textural properties. The support was prepared by template synthesis using tetradecyltrimethylammonium bromide (C_{14}TAB) and modified with bismuth (5–20 wt. % Bi) by impregnation with a $Bi(NO_3)_3 \cdot 5H_2O$ solution in dilute nitric acid followed by calcination at 400 °C. The samples were characterized by small- and wide-angle X-ray diffraction, IR spectroscopy, X-ray fluorescence analysis, scanning electron

microscopy with energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) and low-temperature nitrogen adsorption. The parent silica exhibits a two-dimensional hexagonal (p6mm) mesostructure with a unit cell parameter a_0 = 41.9 Å, a specific surface area of 909 m^2/g, a pore volume of 0.60 cm^3/g and an average pore diameter of 2.6 nm. Bismuth is present as an X-ray amorphous, highly dispersed oxide; no crystalline Bi_2O_3 phases were detected. At 15–20 % Bi the hexagonal ordering is retained and a_0 decreases to 40.4 Å. Loading 5 and 10 % Bi decreases the surface area to 578 and 456 m^2/g at an unchanged pore diameter owing to partial pore blocking. According to EDS, the actual Bi content is close to the nominal one at 5–15 % Bi and is about 15 % at a nominal 20 %, which indicates a limiting bismuth capacity of the support under the impregnation conditions used. The results can be used in the development of sorbents and catalysts based on rice processing waste.

Ключевые слова: мезопористый кремнезём, MCM-41, рисовая шелуха, тетрадецилтриметиламмоний бромид, оксид висмута, пропитка, текстурные характеристики.

Keywords: mesoporous silica, MCM-41, rice husk, tetradecyltrimethylammonium bromide, bismuth oxide, impregnation, textural properties.

Введение

Упорядоченные мезопористые кремнезёмы семейства M41S, прежде всего MCM-41, с момента их открытия [2, 13] остаются одним из наиболее востребованных классов пористых носителей. Регулярная система цилиндрических каналов диаметром 2–10 нм, высокая удельная поверхность (до 1000 $м^2$/г и более) и возможность варьировать размер пор длиной углеводородного радикала ПАВ-темплата делают их удобной матрицей для закрепления каталитически и сорбционно активных компонентов [5, 18].

Традиционными источниками кремния для синтеза MCM-41 служат тетраэтоксисилан и товарный силикат натрия. С точки зрения ресурсосбережения значительный интерес представляет рисовая шелуха – крупнотоннажный отход переработки риса, зола которой содержит свыше 90 % аморфного SiO_2 [6, 12, 15]. Кремнезём рисовой шелухи, в том числе выделенный щелочной экстракцией из её золы, успешно используется для темплатного синтеза упорядоченных мезопористых материалов типа MCM-41 и SBA-15 [3, 7, 16]. Для Республики Узбекистан, где рис выращивается в промышленных масштабах, использование этого сырья имеет и практическое значение.

Оксид висмута и соединения на его основе привлекают внимание как фотокатализаторы видимого диапазона, компоненты оксидных катализаторов и сорбенты, в том числе для улавливания радиоактивного иода, где эффективными оказались и висмутсодержащие мезопористые кремнезёмы [8, 10]. Однако массивный Bi_2O_3 имеет малую удельную поверхность и склонен к полиморфным превращениям при нагревании [9]. Кремнезём рисовой шелухи уже применялся для получения висмутсодержащих фотокатализаторов на основе гетероструктур β-Bi_2O_3/Bi_2SiO_5 [1]. Нанесение висмута на мезопористый кремнезём позволяет получить высокодисперсную оксидную фазу на развитой поверхности, однако при этом необходимо контролировать сохранность мезоструктуры носителя и степень блокирования пор.

Цель работы – синтез мезопористого кремнезёма типа MCM-41 из рисовой шелухи с использованием тетрадецилтриметиламмоний бромида, его модифицирование висмутом в интервале 5–20 мас. % и исследование влияния содержания висмута на структуру, состав, морфологию и текстурные характеристики полученных материалов.

Материалы и методы

Синтез носителя. Мезопористый кремнезём получали темплатным методом, используя в качестве источника кремния рисовую шелуху, а в качестве структурообразующего агента – тетрадецилтриметиламмоний бромид (C_{14}TAB). Темплат удаляли прокаливанием на воздухе при 600 °C со скоростью нагрева 1 °C/мин. Полученный носитель обозначен TDTAB.

Модифицирование висмутом. Висмут вводили методом пропитки. Навеску $Bi(NO_3)_3 \cdot 5H_2O$ растворяли в смеси азотной кислоты (56 %) и дистиллированной воды в объёмном соотношении 3: 7; объём пропиточного раствора составлял 1,5 мл на 1 г носителя. Содержание висмута (5, 10, 15 и 20 мас. %) рассчитывали в пересчёте на металл от суммарной массы сухого образца (Bi + SiO_2); например, образец с 20 % Bi соответствует 20 г Bi на 80 г SiO_2. Пропитку проводили при комнатной температуре в течение 30 мин, затем образцы сушили при 120 °C в течение 8 ч и прокаливали на воздухе при 400 °C в течение 3 ч (скорость нагрева 2 °C/мин). Образцы обозначены TDTAB-xBi-400, где x – номинальное содержание Bi. Навески соли приведены в табл. 1.

Таблица 1. Условия приготовления образцов

Образец	Bi (номин.), мас. %	$Bi(NO_3)_3 \cdot 5H_2O$, г на 1 г SiO_2	Bi_2O_3 в прокалённом образце, мас. %
TDTAB	0	–	0
TDTAB-5%Bi-400	5	0,122	5,5
TDTAB-10%Bi-400	10	0,258	11,0
TDTAB-15%Bi-400	15	0,410	16,4
TDTAB-20%Bi-400	20	0,580	21,8

Методы исследования

Рентгеновские дифрактограммы регистрировали на дифрактометре с CuKα-излучением (λ = 1,5406 Å) в интервале 2θ = 3–70° (для части образцов – до 90°) с шагом 0,01°. Межплоскостные расстояния рассчитывали по уравнению Вульфа–Брэгга, параметр гексагональной ячейки – по соотношению a0 = 2d110 = 4d200/√3. ИК-спектры регистрировали на ИК-Фурье спектрометре в области 4000–450 см−1. Элементный состав определяли методом рентгенофлуоресцентного анализа (РФлА; каналы Si и Bi, интенсивности в имп/с) и энергодисперсионным анализом (ЭДС, безэталонный ZAF-метод, 15 кВ) на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-IT210; микрофотографии получены в режиме вторичных электронов при ускоряющем напряжении 3 кВ. Изотермы адсорбции–десорбции азота измеряли при 77 K на анализаторе Quantachrome Autosorb iQ после дегазации при 200 °C (образец до прокаливания – при 100 °C). Адсорбционные измерения выполнены для образцов TDTAB, TDTAB-5 %Bi-400 и TDTAB-10 %Bi-400,

а также для носителя до удаления темплата. Удельную поверхность рассчитывали многоточечным методом БЭТ [4], общий объём пор – по адсорбции при P/P0 ≈ 0,995, средний диаметр пор – по соотношению D = 4V/S.

Результаты и обсуждение

Рентгенофазовый анализ. На малоугловой дифрактограмме носителя TDTAB (рис. 1а) присутствуют три рефлекса при 2θ = 4,21; 4,86 и 6,42° (d = 20,95; 18,15 и 13,75 Å). Отношение межплоскостных расстояний 1: 1/√(4/3): 1/√(7/3) соответствует индексам (110), (200) и (210) двумерной гексагональной решётки p6mm, характерной для MCM-41 [2, 13]. Параметр a_0, рассчитанный по всем трём рефлексам, согласуется в пределах 0,1 Å и равен 41,9 Å. Наиболее интенсивный рефлекс (100) при 2θ ≈ 2,4° лежит вне интервала съёмки.

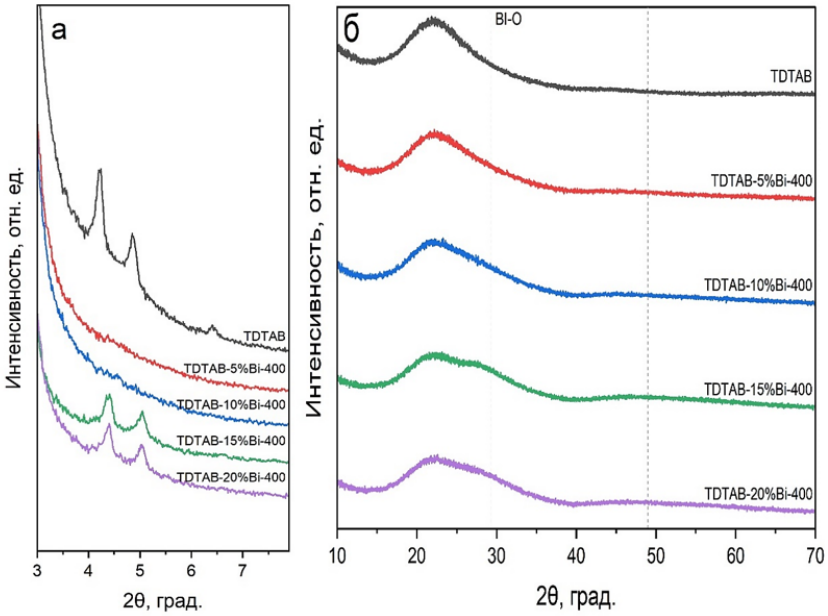


Рисунок 1. Дифрактограммы образцов: а – малоугловая область; б – широкоугловая область

Таблица 2. Параметры мезоструктуры по данным малоугловой рентгеновской дифракции

Образец	$2\theta_{110}$, °	d_{110}, Å	$2\theta_{200}$, °	d_{200}, Å	a_0, Å
TDTAB	4,21	20,95	4,86	18,15	41,9
TDTAB-5%Bi-400	н/р	–	н/р	–	–
TDTAB-10%Bi-400	н/р	–	н/р	–	–
TDTAB-15%Bi-400	4,38	20,14	5,03	17,54	40,4
TDTAB-20%Bi-400	4,38	20,16	5,03	17,55	40,4

Примечание: н/р – рефлексы не разрешаются на уровне фона.

У образцов TDTAB-15 %Bi-400 и TDTAB-20 %Bi-400 рефлексы (110) и (200) сохраняются, но смещаются в сторону больших углов (4,38 и 5,03°), их интенсивность снижается примерно в 2,5 раза, а рефлекс (210) не проявляется. Параметр a_0 уменьшается до 40,4 Å, то есть на ≈3,6 %. Сжатие элементарной ячейки связано с дополнительной термообработкой и конденсацией силанольных групп стенок, а снижение интенсивности –

с уменьшением контраста электронной плотности между стенкой и порой при частичном заполнении каналов соединениями висмута и с частичным разупорядочиванием каркаса при кислотной обработке. У образцов с 5 и 10 % Bi рефлексы мезоструктуры на уровне фона не разрешаются, что указывает на более глубокое разупорядочивание каркаса в этих образцах; выяснение причин такого немонотонного поведения требует дополнительного исследования.

В широкоугловой области (рис. 1б) у всех образцов наблюдается диффузное гало с максимумом при 2θ ≈ 22°, характерное для аморфного SiO_2. Узкие рефлексы кристаллических модификаций Bi_2O_3 (α-, β-) отсутствуют даже при номинальном содержании 20 % Bi. С увеличением содержания висмута растёт интенсивность широких компонент при 2θ ≈ 28–30° и 46–50°, где располагаются наиболее интенсивные отражения оксидов висмута [9]: отношение интенсивностей I_{29}/I_{22} возрастает от 0,54 для TDTAB до 0,63; 0,70; 0,81 и 0,78 для образцов с 5, 10, 15 и 20 % Bi соответственно. Это свидетельствует о том, что висмут после прокаливания при 400 °C находится в рентгеноаморфном высокодисперсном оксидном состоянии, по-видимому, в виде кластеров в каналах и на внешней поверхности частиц носителя.

ИК-спектроскопия. ИК-спектры образцов (рис. 2) типичны для аморфного кремнезёма [11]. Интенсивная полоса при 1049–1057 $см^{-1}$ с плечом около 1210 $см^{-1}$ отвечает асимметричным валентным колебаниям связей Si–O–Si, полоса при 800 $см^{-1}$ – симметричным валентным, а поглощение вблизи 460 $см^{-1}$ – деформационным колебаниям O–Si–O. Слабая широкая полоса при 3400 $см^{-1}$ и полоса при 1630 $см^{-1}$ относятся к валентным колебаниям OH-групп и деформационным колебаниям адсорбированной воды. Полосы валентных колебаний C–H метиленовых групп темплата (2850–2925 $см^{-1}$) практически отсутствуют, что подтверждает полноту удаления C_{14}TAB при прокаливании.

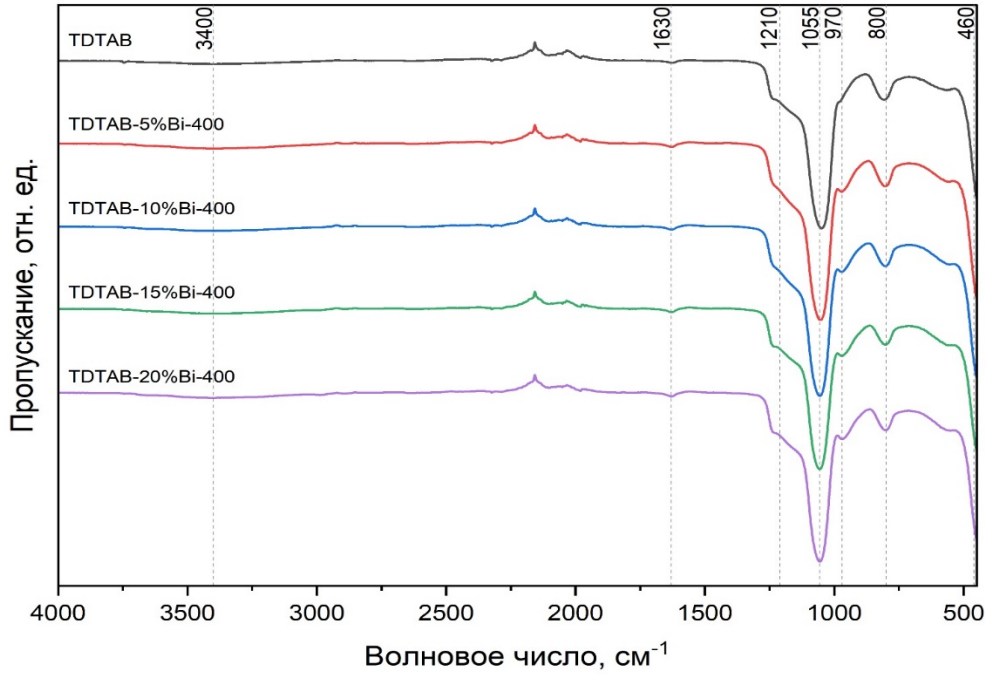


Рисунок 2. ИК-спектры исходного и модифицированных висмутом образцов (область 2400–1900 $см^{-1}$ исключена из-за аппаратного артефакта)

Введение висмута приводит к смещению основной полосы Si–O–Si от 1049 $см^{-1}$ (TDTAB) к 1053–1057 $см^{-1}$ и к усилению полосы при 970 $см^{-1}$, которая у исходного носителя проявляется лишь как слабое плечо. Отношение оптических плотностей A_{970}/A_{1055} возрастает от 0,15 для TDTAB до 0,18–0,21 для модифицированных образцов. Полосу при 960–970 $см^{-1}$ относят к валентным колебаниям Si–OH и Si–O–M (M – гетероатом) [11]; её усиление указывает на гидроксилирование поверхности при кислотной пропитке и на взаимодействие оксидных форм висмута с силанольными группами носителя с образованием связей Si–O–Bi. Взаимодействие оксида висмута с кремнезёмом рисовой шелухи при термообработке может приводить и к образованию силиката Bi_2SiO_5 [1]; в условиях настоящей работы (400 °C) кристаллические силикатные фазы рентгенографически не выявлены. Собственные колебания Bi–O располагаются ниже 600 $см^{-1}$ и перекрываются с деформационными колебаниями O–Si–O.

Элементный состав и морфология. По данным РФлА во всех модифицированных образцах присутствует висмут; отношение интенсивностей линий Bi/Si составляет 0,69; 1,14; 1,86 и 1,53 для образцов с 5, 10, 15 и 20 % Bi. Количественная оценка выполнена методом ЭДС (табл. 3). Поскольку безэталонный анализ занижает содержание кислорода (атомное отношение O/Si в исходном образце ≈1 вместо 2), содержание висмута дополнительно пересчитано на систему Bi + SiO_2 исходя из стехиометрии кремнезёма.

Таблица 3. Содержание висмута в образцах по данным ЭДС и РФлА

Образец	Bi (номин.), мас. %	Bi (ЭДС), мас. %	Bi/(Bi + SiO_2), мас. %	I_{Bi}/I_{Si} (РФлА)
TDTAB	0	не обн.	0	–
TDTAB-5%Bi-400	5	8,5 ± 0,7 (2)	6,6	0,69
TDTAB-10%Bi-400	10	12,2 ± 2,4 (2)	9,5	1,14
TDTAB-15%Bi-400	15	20,8 ± 4,2 (2)	16,7	1,86
TDTAB-20%Bi-400	20	19,7 ± 1,1 (3)	15,3	1,53

Примечание: для ЭДС приведены среднее ± стандартное отклонение, в скобках – число анализируемых участков.

Пересчитанное содержание висмута для образцов с 5, 10 и 15 % Bi близко к номинальному (6,6; 9,5 и 16,7 %), тогда как для образца с номинальными 20 % оно составляет лишь 15,3 %. Этот результат согласуется с данными РФлА, по которым отношение I_{Bi}/I_{Si} для образца с 20 % Bi ниже, чем для образца с 15 % Bi. По-видимому, при содержании около 15–16 % Bi достигается предел, при котором весь висмут из пропиточного раствора может быть удержан носителем в условиях используемой методики; избыток соли может частично теряться при сушке и прокаливании. Разброс значений между участками (до ±4 %) указывает на некоторую неоднородность распределения висмута на микронном уровне.

На СЭМ-изображениях (рис. 3) исходный носитель и модифицированные образцы представлены рыхлыми агрегатами частиц размером от 0,3 до 1–2 мкм. Отдельные крупные кристаллиты оксида висмута не наблюдаются, что согласуется с рентгеноаморфным состоянием висмута. У образца с 20 % Bi агрегаты выглядят более компактными, с более чёткими границами частиц.

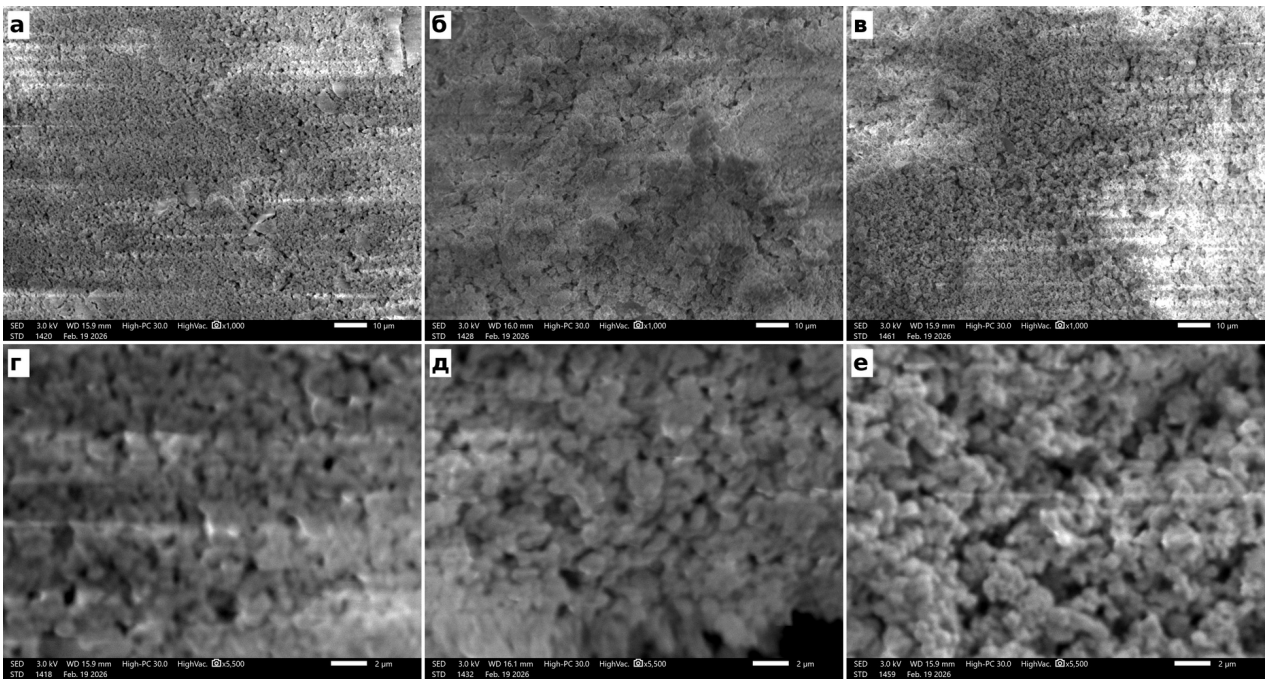


Рисунок 3. СЭМ-изображения образцов TDTAB (а, г), TDTAB-5 %Bi-400 (б, д) и TDTAB-20 %Bi-400 (в, е) при увеличении ×1000 (а–в) и ×5500 (г–е)

Текстурные характеристики. Изотермы адсорбции–десорбции азота представлены на рис. 4, рассчитанные параметры – в табл. 4. Образец носителя до прокаливания практически непорист ($S_{БЭТ}$ = 12 м^2/г, V = 0,014 см^3/г), поскольку каналы заполнены мицеллами C_{14}TAB. Удаление темплата и последующее модифицирование приводят к образованию развитой пористой структуры.

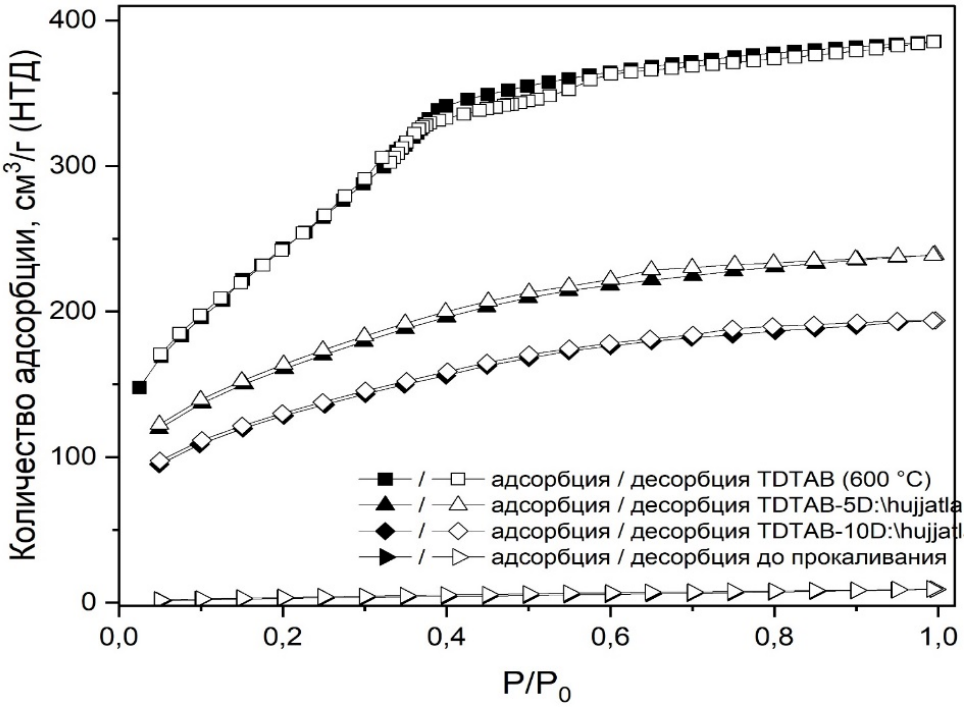


Рисунок 4. Изотермы адсорбции (закрашенные символы) и десорбции (незакрашенные символы) азота при 77 K

Изотерма носителя TDTAB, прокалённого при 600 °C, относится к типу IV(b) по классификации IUPAC [17]: после заполнения монослоя наблюдается резкий подъём адсорбции в интервале P/P_0 = 0,30–0,40, обусловленный капиллярной конденсацией в однородных цилиндрических мезопорах, за которым следует протяжённое плато. Узкая петля гистерезиса в области P/P_0 = 0,42–0,58 указывает на небольшую долю пор с сужениями. Удельная поверхность носителя составляет 909 $м^2/г$, объём пор – 0,598 $см^3/г$, средний диаметр пор D = 4V/S – 2,63 нм. С учётом параметра ячейки a_0 = 41,9 Å толщина стенки оценивается в ≈1,6 нм. Полученные величины типичны для материалов MCM-41, синтезированных с C_{14}TAB [14, 18].

Изотермы образцов TDTAB-5 %Bi-400 и TDTAB-10 %Bi-400 сохраняют значительную адсорбцию в области малых давлений, однако ступень капиллярной конденсации вырождается в плавный подъём до P/P_0 ≈ 0,5, а петля гистерезиса становится узкой и растянутой. Это указывает на уширение распределения пор по размерам и частичную потерю однородности каналов, что согласуется с исчезновением малоугловых рефлексов у этих образцов (рис. 1а).

Таблица 4. Текстурные характеристики образцов по данным адсорбции азота

Образец	**$S_{БЭТ}$, $м^2/г$**	**$C_{БЭТ}$**	**$V_{пор}$, $см^3/г$**	**D = 4V/S, нм**	**$S_{БЭТ}$ на 1 г SiO_2, $м^2/г$**
TDTAB (до прокаливания)	12	–	0,014	–	–
TDTAB (600 °C)	909	57	0,598	2,63	909
TDTAB-5%Bi-400	578	116	0,371	2,56	612
TDTAB-10%Bi-400	456	136	0,301	2,64	512

Введение 5 и 10 % Bi снижает удельную поверхность с 909 до 578 и 456 $м^2/г$ (на 36 и 50 %), объём пор – с 0,598 до 0,371 и 0,301 $см^3/г$ (на 38 и 50 %). В пересчёте на 1 г кремнезёма (с учётом доли Bi_2O_3, табл. 1) поверхность уменьшается до 612 и 512 $м^2/г$, то есть на 33 и 44 %. Следовательно, снижение не сводится к «разбавлению» носителя тяжёлым оксидом и обусловлено частичным блокированием каналов оксидными формами висмута, а также частичным разупорядочиванием каркаса при кислотной пропитке. Средний диаметр пор при этом практически не меняется (2,56–2,64 нм): часть каналов блокируется целиком (закупоривание устьев), а оставшиеся сохраняют исходный размер. Рост константы $C_{БЭТ}$ (57 → 116 → 136) отражает усиление взаимодействия азота с поверхностью, модифицированной оксидом висмута.

Заключение

Из рисовой шелухи с использованием тетрадецилтриметиламмоний бромида получен мезопористый кремнезём типа MCM-41 с двумерной гексагональной структурой p6mm (a_0 = 41,9 Å).

Модифицирование носителя висмутом методом пропитки раствором $Bi(NO_3)_3 \cdot 5H_2O$ в разбавленной HNO_3 с прокаливанием при 400 °C приводит к формированию рентгеноаморфной высокодисперсной оксидной фазы висмута; кристаллические модификации Bi_2O_3 не образуются вплоть до 20 % Bi. При содержании 15–20 % Bi гексагональное упорядочение сохраняется при сжатии ячейки до a_0 = 40,4 Å.

По данным ИК-спектроскопии введение висмута сопровождается смещением полосы Si–O–Si к 1053–1057 $см^{-1}$ и усилением полосы при 970 $см^{-1}$, что указывает на взаимодействие висмута с силанольными группами носителя. Фактическое содержание висмута близко к номинальному при 5–15 % Bi; при номинальных 20 % оно составляет около 15 %, что свидетельствует о предельной ёмкости носителя по висмуту в условиях используемой методики пропитки.

Носитель обладает удельной поверхностью 909 $м^2/г$ и объёмом пор 0,60 $см^3/г$ при диаметре пор 2,6 нм. Введение 5 и 10 % Bi снижает поверхность до 578 и 456 $м^2/г$ (на 33 и 44 % в пересчёте на SiO_2) при неизменном диаметре пор, что обусловлено частичным блокированием каналов оксидными формами висмута.

Список литературы

1. Arefieva O.D., Vasilyeva M.S., Lukiyanchuk I.V. et al. Preparation and photocatalytic properties of β-Bi2O3/Bi2SiO5 heterostructures // Russian Journal of Inorganic Chemistry. – 2021. – T. 66, № 6. – P. 943–949. – DOI: 10.1134/S0036023621060036.
2. Beck J.S., Vartuli J.C., Roth W.J. et al. A new family of mesoporous molecular sieves prepared with liquid crystal templates // Journal of the American Chemical Society. – 1992. – T. 114. – P. 10834–10843.
3. Bhagiyalakshmi M., Yun L.J., Anuradha R., Jang H.T. Utilization of rice husk ash as silica source for the synthesis of mesoporous silicas and their application to CO2 adsorption through TREN/TEPA grafting // Journal of Hazardous Materials. – 2010. – T. 175. – P. 928–938.
4. Brunauer S., Emmett P.H., Teller E. Adsorption of gases in multimolecular layers // Journal of the American Chemical Society. – 1938. – T. 60. – P. 309–319.
5. Ciesla U., Schüth F. Ordered mesoporous materials // Microporous and Mesoporous Materials. – 1999. – T. 27. – P. 131–149.
6. Della V.P., Kühn I., Hotza D. Rice husk ash as an alternate source for active silica production // Materials Letters. – 2002. – T. 57. – P. 818–821.
7. Gebretatios A.G. Kadiri Kanakka Pillantakath A.R., Witoon T. et al. Rice husk waste into various template-engineered mesoporous silica materials for different applications: a comprehensive review on recent developments // Chemosphere. – 2023. – T. 310. – Art. 136843. – DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.136843.
8. Hao Y., Tian Z., Liu C., Xiao C. Recent advances in the removal of radioactive iodine by bismuth-based materials // Frontiers in Chemistry. – 2023. – T. 11. – Art. 1122484. – DOI: 10.3389/fchem.2023.1122484.

9. Harwig H.A., Gerards A.G. The polymorphism of bismuth sesquioxide // Thermochimica Acta. – 1979. – T. 28. – P. 121–131.
10. He R., Xu D., Cheng B. et al. Review on nanoscale Bi-based photocatalysts // Nanoscale Horizons. – 2018. – T. 3. – P. 464–504.
11. Innocenzi P. Infrared spectroscopy of sol–gel derived silica-based films: a spectra-microstructure overview // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2003. – T. 316. – P. 309–319.
12. Kalapathy U., Proctor A., Shultz J. A simple method for production of pure silica from rice hull ash // Bioresource Technology. – 2000. – T. 73. – P. 257–262.
13. Kresge C.T., Leonowicz M.E., Roth W.J. et al. Ordered mesoporous molecular sieves synthesized by a liquid-crystal template mechanism // Nature. – 1992. – T. 359. – P. 710–712.
14. Kruk M., Jaroniec M., Sayari A. Application of large pore MCM-41 molecular sieves to improve pore size analysis using nitrogen adsorption measurements // Langmuir. – 1997. – T. 13. – P. 6267–6273.
15. Rodriguez-Otero A., Vargas V., Galarneau A. et al. Sustainable harnessing of SiO2 nanoparticles from rice husks: a review of the best synthesis and applications // Processes. – 2023. – T. 11, № 12. – Art. 3373. – DOI: 10.3390/pr11123373.
16. Sennoun L., Lee C.-C., Fretel Y. et al. Direct pseudomorphic transformation of silica from rice husk into organo-functionalized MCM-41 // New Journal of Chemistry. – 2024. – T. 48. – P. 7052–7069. – DOI: 10.1039/D4NJ00715H.
17. Thommes M., Kaneko K., Neimark A.V. et al. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report) // Pure and Applied Chemistry. – 2015. – T. 87. – P. 1051–1069.
18. Zhao X.S., Lu G.Q., Millar G.J. Advances in mesoporous molecular sieve MCM-41 // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2090. – T. 35. – P. 2075–2090.

Статья поступила в редакцию: 13.09.2026
Статья принята к публикации: 29.09.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 691.3+620.1

DOI: 10.32743/UniTech.2026.151.10.23480

Ускоренный метод определения текучести цементного теста с химическими добавками

Мухамедбаев Абдугафур Абдувалиевич
PhD, доц.
кафедры Технология строительных материалов и конструкций
Ташкентский архитектурно-строительный университет,
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: mabdugofura@gmail.com

Шакаров Тулкин Исматович
канд. техн. наук, доц.,
кафедры «Металлургия»
Филиала Национального исследовательского технологического университета «МИСИС» в г. Алмалык,
Республика Узбекистан, г. Алмалык
E-mail: shakarovtulkin@gmail.com

Мухамедбаев Абдували Абдусаттарович
канд. техн. наук, доц., директор
ООО“ANTENN-BRANCH”,
Республика Узбекистан, Ташкент
E-mail: sciencecemtech@mail.ru

Масидиков Шерзад Абдурасулович
магистр,
заместитель директора медно-обогатительной фабрики №3 АО “Алмалыкский ГМК”,
Республика Узбекистан, г. Алмалык
E-mail: sh.masidikov@agmk.uz

Кадыров Хайрулло Марибжанович
главный технолог
ООО “RECO BREND SEMENT”,
Республика Узбекистан, г. Андижан
E-mail: hajrullokadirov583@gmail.com

Библиографическое описание: Ускоренный метод определения текучести цементного теста с химическими добавками // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Мухамедбаев А.А. [и др.]. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23480

Accelerated method for determining the fluidity of cement dough with chemical additives

Mukhamedbaev Abdugofur
PhD
Associate Professor of the Department of Technology of Building Materials and Structures of Tashkent University of Architecture and Civil Engineering
Uzbekistan, Tashkent
Shakarov Tulkin
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor of the Department of Metallurgy
Branch of the National University of Science and Technology «MISIS» in Almalyk, Uzbekistan, Almalyk
Mukhamedbaev Abduvali
Candidate of Technical Sciences
“ANTENN-BRANCH” LLC,
Uzbekistan, Tashkent
Masidikov Sherzad
Master
Copper Processing Plant No.3 of Almalyk MMCJSC
Uzbekistan, Almalyk
Kadyrov Khairullo
Chief Technologist of “RECO BRAND SEMENT” LLC,
Uzbekistan, Andijan

Аннотация

Рассматриваются вопросы разработки простого, недорогого и применяемого в полевых условия метода определения текучести цементного теста с химическими добавками. Метод основан на определении растекаемости цементного теста. Для определения растекаемости цементного теста предложено использование цилиндра диаметром 50 мм и высотой 60 мм. Использование предлагаемого метода позволяет определить совместимость вводимого при помоле цементной шихты химической добавки и её оптимальное количество. На примере смеси (г.): дробленый клинкер – 3000, базальт – 800, гипсовый камень – 200, измельчаемой в однокамерной лабораторной шаровой мельнице диаметром Ø42 см и длиной 50 см, общем весе шаровой загрузки – 102 кг и числа оборотов корпуса мельницы – 52 об./мин. показано возможность существования трех вариантов растекаемости цементного теста. Количество вводимого пластификатора принят равным 0,35 % от веса цемента. Первый состав– когда химическая добавка не совместима в составом цемента, второй соста – при совместимости химической добавки и цемента и третей – когда дозировка химической добавки превышает оптимальное значение. Метод не требует наличия высоких квалифицированных требований у персонала испытательных лабораторий. Отмечается, что результаты испытаний ускоренным методом могут использоваться для корректировки состава бетонных смесей и контроля сохраняемости их реологических характеристик.

Abstract

The issues of developing a simple, in expensive and field-applied method for determining the fluidity of cement dough with chemical additives are considered. The method is based on determining the spreadability of cement paste. Todeter mine the spreadability of cement paste, it is

proposed to use a cylinder with a diameter of 50mmand a height of 60mm. The use of the proposed method makes it possible to determine the compatibility of the chemical additive introduced during the grinding of the cement charge and its optimal amount. Using the example of a mixture (g.): crushed clinker–3000, basalt–800, gypsum stone–200, crushed in a single–chamber laboratory ball mill with a diameter of Ø42cmand a length of 50cm, the total weight of the ballloadis102kgand the number of revolutions of the millbodyis52rpm.thepossibility of existence of three variants of spreading of cement dough is shown. The amount of plastic izer introduced is assumed to be equal to 0.35 % of the cement weight. The first is when the chemical additive is incompatible with the composition of cement, the second is when the chemical additive and cement are compatible, and the third is when the dosage of the chemical additive exceeds the optimal value. The method does not require highly qualified requirements from the personnel of the testing laboratories. It is noted that the accelerated test results can be used to adjust the composition of concrete mixtures and control the preservation of the irrheological characteristics.

Ключевые слова: совместимость цемента с добавками, цементное тесто, тест Кантро, портландцемент, клинкер, текучесть цементного теста, метод определения текучести.

Keywords: compatibility of cement with additives, cement dough, Cantro test, portland cement, clinker, fluidity of cement dough, a method for determining fluidity.

Введение

Стремление к улучшению свойств портландцемента привело к изменениям её вещественного и гранулометрического состава. Основную часть производимых цементов в Узбекистане составляют цементы с повышенной удельной поверхностью. В технологии бетонирования все больше используются бетонные смеси с высокой текучестью. Несомненно, повышенные требования к подвижности бетонных смесей при низком водоцементном отношении и повышенных дозировках тонкодисперсных вяжущих достигаются применением специальных химических добавок. Для этих целей широко применяют добавки-пластификаторы [3].

Несмотря на многообразие платифицирующих добавок, предопределить их совместимости с конкретным цементом невозможно. Процессы, протекающие из-за многофазности вяжущих систем и бетонной смеси, слишком сложны, чтобы можно было сделать определенные выводы на основе практических испытаний. По этой причине при производстве бетонных и растворных смесей сохраняется практика подбора состава композиции пластифицирующих добавок под конкретный вещественный состав бетонной или растворной смеси с учетом необходимой удобоукладываемости и сохраняемости ее свойств во времени.

Хотя, принято считать, что все процессы формирования основных физико-химических и физико-механических свойств портландцемента заканчиваются на этапе тонкого помола цемента в мельнице, поверхностная активность цемента зависит от условий его транспортирования и хранения. Даже при использовании одних и тех же типов минеральных добавок простая смена партии цемента, поставляемого одним и тем же производителем, или долгий срок хранения партии цемента в силосе производителя или бункере у потребителя могут изменить эффективность добавки [1, 4, 10].

Из известных методик оценки совместимости цемента и химической добавки с высокой воспроизводимостью и наиболее применимым к полевым условиям является тест Кантро по мини-конусу. Хотя метод оценки текучести свежего цементного теста по мини-конусу Кантро широко используется на практике, остается вопрос трудности изготовления мини-конуса данной конфигурации.

Целью данного исследования является создание простого, доступного и позволяющего применение в полевых условиях ускоренного метода определения текучести цементного теста с химическими добавками.

Задачи исследования

а) разработка портативной методики определения совместимости химической добавки к цементу путем измерения растекаемости цементного теста,

б) применение предлагаемой методики для определения совместимости химической добавки к цементу.

Материалы и методы

Тесты определения текучести цементного теста с химическими добавками не стандартизированы. Из всех известных методик оценки совместимости с высокой воспроизводимостью, описанных в технической литературе [2, 5–9], наиболее подходит к полевым условиям тест Кантро по мини-конусу. Это быстрый, недорогой и широко применяемый способ оценки текучести свежего цементного теста. Цементное тесто закладывается в конус с уплотнением. При поднятии конуса материал начинает течь и останавливается, когда напряжение сдвига достигает предела текучести материала. Общий вид мини-конуса Кантро приводится на рис. 1.

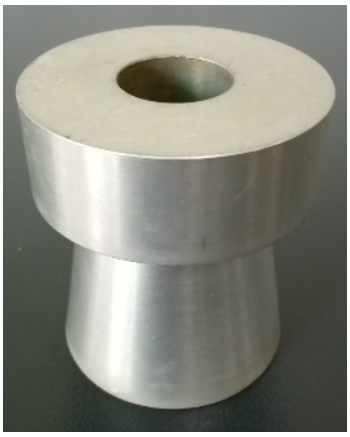


Рисунок 1. Мини-конус Кантро

Для этих целей нами предлагается использовать метод определения текучести цементного теста с применением пластмассового цилиндра внешним диаметром 50 мм, толщиной стенки 2 мм и высотой 60 мм.

Цилиндр устанавливали на металлический диск диаметром 300 мм, предварительно цилиндр и пластину увлажняли. Диск имеет крестообразную разметку через центр, вдоль разметки имеет шкалу радиусом 50 и 100 мм. Цилиндр заполняли цементным тестом за один прием (см. рис. 2, рис. 3).

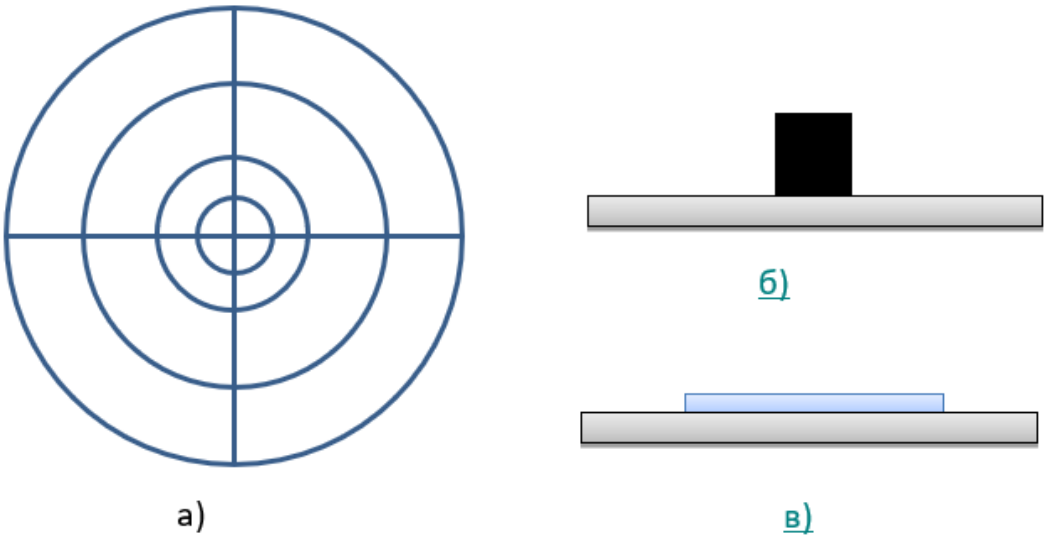


Рисунок 2. Схема предложенного метода: а) схема размети диска; б) расположение цилиндра на диске; в) растекание объема теста по диску

Излишки теста срезают. Подъем цилиндра резкое, осуществляется вручную без резких толчков и встряхиваний. После полного растекания цементного теста, примерно 30 сек после поднятия цилиндра, измеряют расплыв цилиндра (текучесть) в трех разных направлениях. За результат принимаем среднее значение. Эксперимент для каждой точки повторяют 3 раза.

Исследования проводились в испытательной лаборатории ООО «RECO BREND SEMENT». В исследованиях использован цемент ЦЕМ II/А-К 32,5Н ООО «RECO BREND SEMENT» и пластифиаторы.

Цементное тесто приготовлено из 200 г цемента с В/Ц = 0,35. Химические добавки вводят в воду затворения с таким расчетом, чтобы В/Ц оставалось постоянным. Дозировка химической добавки – не ограничено. Время перемешивания составляет 100 с.

Остаток на сите с сеткой 008 и удельную поверхность определяли в соответствии с общепринятыми методиками.

Помол клинкера, базальта и гипсового камня осуществляли в однокамерной лабораторной шаровой мельнице диаметром Ø42 см и длиной 50 см. Общий вес шаровой загрузки – 102 кг, число оборотов корпуса мельницы – 52 об./мин.

Состав измельчаемой смеси постоянный (г.): дробленый клинкер – 3000, базальт – 800, гипсовый камень – 200. Количество вводимого пластификатора принят равным 0,35 % и 0,7 % от веса цемента. Время помола – 40 минут.

На продуктах помола определяли: остаток на сите с сеткой 008, удельную поверхность и растекаемость цементного теста.

Портландцемент получают путем тонкого измельчения смеси сырья, состоящей из клинкера, минеральной добавки и гипсового камня. Минеральная добавка, содержащаяся в цементе, определяется типом продукта. Например, в ЦЕМ II/А-К содержание минеральной добавки не должно превышать 20 %. В качестве минеральных добавок на предприятии могут использоваться базальт и известняк. В лабораторных исследованиях содержание гипсового камня было принято равным 3 %. Химический состав используемых материалов приведен в табл. 1.

Таблица 1. Химический состав сырьевых материалов

Название материала	Химический состав, %							
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	п.п.п.	сумма
известняк	1,60	1,05	0,67	53,50	0,50	0,15	42,30	99,77
базальт	51,50	11,00	4,40	12,70	3,00	1,50	13,60	97,70
клинкер	20,63	5,01	3,64	66,47	2,45	1,07	0,11	99,38

Химический и минералогический состав, физико-механические и прочностные свойства клинкера приведены в табл. 2, 3 и 4.

Таблица 2. Химический и минералогический состав клинкера

Производитель клинкера	Химический состав, %						Минералогический состав,%			
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
RECO BREND SEMENT	20,63	5,01	3,64	66,47	2,45	1,07	71,95	4,87	7,10	11,07

Таблица 3. Физико-механические показатели клинкера

клинкер	Остаток на сите 008, %	Удельняя поверхность, $м^2/кг$	Время схватывания, минут	
			начало	конец
RECO BREND SEMENT	1,50	377	65	80

Таблица 4. Прочностные показатели клинкера

клинкер	Прочностные показатели, МПа			
	изгиб		сжатие	
	2 сут.	28 сут.	2 сут.	28 сут.
RECO BREND SEMENT	6,1	8,5	24,9	51,6

Пластификаторы.

В качестве пластификаторов использовали органические соединения, соответствующие Ts 30387195-01-2021 “Бетон и бетонные смеси”. Пластификаторы предложены ООО «BAAS CEMICAL» и ООО «MASTER CEMICAL».

С добавкой пластификаторов изготовлено тесто трех разных составов, которые были испытаны предложенным методом. Составы выбраны так, чтобы проиллюстрировать разное растекание.

Состав 1. Дробленый клинкер – 3000 г, базальт – 800 г, гипсовый камень – 200 г, пластификатор «SAMO», предложенный ООО «MASTER CEMICAL» – 10,5 г (0,35 %).

Состав 2. Дробленый клинкер – 3000 г, базальт – 800 г, гипсовый камень – 200 г, пластификатор «CEMENTMIX», предложенный ООО «BAAS CEMICAL» – 10,5 г (0,35 %).

Состав 3. Дробленый клинкер – 3000 г, базальт – 800 г, гипсовый камень – 200 г, пластификатор «CEMENTMIX», предложенный ООО «BAAS CEMICAL» - 21,0 г (0,7%).

Результаты и обсуждение

При применении предложенного метода для исследованного состава теста быели получены следующие результаты.

Было отмечено три варианта растекаемости цементного теста.

Первый – когда форма после высвобождения теста из цилиндра формы почти не менялось относительно исходной (рис. 3). Форма теста характеризуется средним значением геометрии, расчитанному по результатам трех измерений как цилиндр высотой 55 мм и диаметром по основанию не более 52 мм.



Рисунок 3. Общий вид растекаемости цементного теста (вариант 1)

Второй вариант, когда объем цементного теста растекается в виде пятна диаметром 75 – 85 мм расчитанному как среднее значение по результатам трех измерений (рис. 4).



Рисунок 4. Общий вид растекаемости цементного теста (вариант 2)

Третий вариант, когда объем цементного теста растекается в виде пятна диаметром 175 мм и более расчитанному как среднее значение по результатам трех измерений (рис. 5).



Рисунок 5. Общий вид растекаемости цементного теста (вариант 3)

Таким образом предложенный метод позволяет оценивать текучесть цементного теста.

Исследование различных составов цементного теста позволяет сделать следующие выводы.

Для состава 1 объем цементного теста сохранил форму цилиндра (см. рис. 3), следовательно, пластификатор «SAMO» не совместим с данным составом цемента. Для состава 2 цементного теста растекается в виде пятна диаметром 75 – 85 мм (см. рис. 4). Следовательно, применяемый пластификатор «CEMENTMIX» совместим с данным составом цемента и может быть рекомендовано к использованию в технологическом процессе производства пластифицированного цемента. Для третьего состава теста получена максимальная растекаемость цементного теста, что показывает очень высокую степень пластификации данного состава цемента; следовательно использовании пластификатора «CEMENTMIX» в количестве 0,7 % от веса цемента в дальнейшем может положительно сказаться на свойствах бетонов, полученных на основе данного вида пластифицированного цемента.

Заключение

1. Предлагаемый ускоренный метод определения текучести цементного теста с химическими добавками вполне пригоден для определения совместимости применяемого пластификатора к конкретному составу цемента.

2. Предлагаемый ускоренный метод определения текучести цементного теста с химическими добавками прост в использовании, недорогой в исполнении и вполне пригоден к применению в полевых условиях.

3. Посредством предлагаемого ускоренного метода определения текучести цементного теста с химическими добавками можно корректировать оптимальный ввод пластификатора при помоле шихты цемента.

Список литературы

1. Шахова Л.Д., Коновалов В.М. К вопросу водоотделения // Цемент и его применение. – 2022. – № 5. – С. 50–53.
2. Barnes H.A. Rotating vane rheometry – a review // J. Non-Newtonian Fluid Mech. – 2001. – Т. 98. – P. 1–14.

3. Cheung J., Roberts L., Liu J. Admixtures and sustainability // Cem. Concr. Res. – 2018. – T. 114. – P. 79–89.
4. Dubina E., Wadsö L., Plank J. A sorption balance study of water vapour sorption on anhydrous cement minerals and cement constituents // Cem. Concr. Res. – 2011. – T. 41. – P. 1196–1204.
5. Kantro D.L. Influence of water-reducing admixtures on properties of cement paste – a miniature slump test // Cem. Concr. Aggreg. – 1980. – T. 2. – P. 95–102.
6. Papayianni I., Tsohos G., Oikonomou N., Mavria P. Influence of superplasticizer type and mix design parameters on the performance of them in concrete mixtures // Cem. Concr. Compose. – 2005. – T. 27. – P. 217–222.
7. Roussel N., Coussot P. Fifty-cent rheometer for yield stress measurements: From slump to spreading flow // J. Rheol. – 2005. – T. 49. – P. 705–718.
8. Roussel N., Stefani C., Leroy R. From mini-cone test to Abrams cone test: Measurement of cement-based materials yield stress using slump tests // Cem. Concr. Res. – 2005. – T. 35. – P. 817–822.
9. Shrihari S., Seshagiri Rao M.V., Srinivasa Reddy V., Manasa A. Compatibility assessment of commercial cements with superplasticizers // ICMED. – 2020. – T. 184.
10. Stoian J., Oey T., Bullard J.W., Huang J. et al. New insights into the prehydration of cement and its mitigation // Cem. Concr. Res. – 2015. – T. 70. – P. 94–103.

References

1. Shakhova L.D., Konovalov V.M. [On the Issue of Water Separation] // Tsementi ego primenenie. – 2022. – No. 5. (In Russ.).
2. Barnes H.A. Rotating vane rheometry – a review // J. Non-Newtonian Fluid Mech. – 2001. – Vol. 98. – P. 1–14.
3. Cheung J., Roberts L., Liu J. Admixtures and sustainability // Cem. Concr. Res. – 2018. – Vol. 114. – P. 79–89.
4. Dubina E., Wadsö L., Plank J. A sorption balance study of water vapour sorption on anhydrous cement minerals and cement constituents // Cem.Concr. Res. – 2011. – Vol. 41. – P. 1196–1204.
5. Kantro D.L. Influence of water-reducing admixtures on properties of cement paste – a miniature slump test // Cem. Concr. Aggreg. – 1980. – Vol. 2. – P. 95–102.
6. Papayianni I., Tsohos G., Oikonomou N., Mavria P. Influence of superplasticizer type and mix design parameters on the performance of them in concrete mixtures // Cem. Concr. Compose. – 2005. – Vol. 27. – P. 217–222.
7. Roussel N., Coussot P. Fifty-cent rheometer for yield stress measurements: From slump to spreading flow // J. Rheol. – 2005. – Vol. 49. – P. 705–718.
8. Roussel N., Stefani C., Leroy R. From mini-cone test to Abrams cone test: Measurement of cement-based materials yield stress using slump tests // Cem. Concr. Res. – 2005. – Vol. 35. – P. 817–822.
9. Shrihari S., Seshagiri Rao M.V., Srinivasa Reddy V., Manasa A. Compatibility assessment of commercial cements with superplasticizers // ICMED. – 2020. – Vol. 184.

10. Stoian J., Oey T., Bullard J.W., Huang J. et al. New insights into the prehydration of cement and its mitigation // Cem. Concr. Res. – 2015. – Vol. 70. – P. 94–103.

Статья поступила в редакцию: 25.08.2026
Статья принята к публикации: 31.08.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 628.31:663.4:574

DOI: 10.32743/UniTech.2026.151.10.23557

Экологическая опасность органических веществ, взвешенных частиц, коллоидных соединений, биогенных элементов и моющих средств в сточных водах пивоваренного производства

Мухамедов Кабилджан Гафурович
д-р техн. наук, проф.
Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: mukhamedovanilufarkhon@gmail.com
Насирова Нилуфархон Кабилджановна
канд. хим. наук, доц.
Ташкентский государственный аграрный университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Ши-Сянь Вячеслав Викторович
соискатель
Ташкентский химико-технологический институт
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Мухамедов Жамалиддин Кабилджанович
канд. хим. наук, PhD
Ташкентский химико-технологический институт
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Ecological hazard of organic substances, suspended particles, colloidal compounds, biogenic elements and detergents in brewery wastewater

Mukhamedov Kabildjan Gafurovich
doctor of Technical Sciences, Professor
Islam Karimov Tashkent State Technical University
Republic of Uzbekistan, Tashkent
Nasirova Nilufarkhon Kabildjanovna
candidate of Chemical Sciences, Associate Professor
Tashkent State Agrarian University
Republic of Uzbekistan, Tashkent
Shi-Sian Vyacheslav Viktorovich
Applicant Tashkent Institute of Chemical Technology
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Библиографическое описание: Экологическая опасность органических веществ, взвешенных частиц, коллоидных соединений, биогенных элементов и моющих средств в сточных водах пивоваренного производства // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Мухамедов К.Г. [и др.]. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23557

Mukhamedov Jamaliddin Kabildjanovich
Researcher
Tashkent Institute of Chemical Technology
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

Целью исследования является оценка экологической опасности основных групп загрязняющих веществ, содержащихся в сточных водах пивоваренного производства, и обоснование последовательной схемы их снижения. Методологической основой работы служил компонентный анализ состава производственных стоков с выделением органических веществ, взвешенных частиц, коллоидных соединений, биогенных элементов, а также остаточных моющих и дезинфицирующих средств. Для каждой группы оценивались источник поступления, физико-химическое состояние, влияние на процессы очистки и потенциальное воздействие на водные объекты. Показано, что высокая органическая нагрузка формируется за счёт остатков солода, сусла, дрожжей, белковых и углеводных соединений и сопровождается ростом ХПК и БПК и риском кислородного дефицита. Взвешенные и коллоидные частицы повышают мутность и затрудняют отстаивание, соединения азота и фосфора создают риск эвтрофикации, а моющие средства могут изменять pH и подавлять активность микроорганизмов биологической очистки. Установлено, что наиболее высокий уровень экологической опасности характерен для органических веществ, коллоидных соединений и биогенных элементов. Практическим результатом исследования является поэтапная схема экологического контроля и очистки, включающая усреднение, механическое отделение примесей, регулирование pH, коагуляцию, флокуляцию, отстаивание, фильтрацию, биологическую очистку и сорбционную доочистку.

Abstract

The aim of the study is to assess the ecological hazard of the main groups of pollutants contained in brewery wastewater and to substantiate a sequential scheme for reducing their impact. The methodological basis was a component analysis of industrial wastewater with identification of organic substances, suspended particles, colloidal compounds, biogenic elements, and residual cleaning and disinfecting agents. For each group, the source of entry, physicochemical state, influence on treatment processes, and potential impact on receiving waters were evaluated. The results show that a high organic load is formed by residues of malt, wort, yeast, proteins, and carbohydrates and is accompanied by increased COD and BOD and a risk of oxygen depletion. Suspended and colloidal particles increase turbidity and complicate sedimentation, nitrogen and phosphorus compounds create a risk of eutrophication, while detergents may alter pH and inhibit microorganisms involved in biological treatment. The highest ecological hazard was attributed to organic substances, colloidal compounds, and biogenic elements. The practical result of the study is a stepwise environmental control and treatment scheme including equalization, mechanical separation, pH adjustment, coagulation, flocculation, sedimentation, filtration, biological treatment, and sorption post-treatment.

Ключевые слова: сточные воды пивоваренного производства, органические вещества, взвешенные частицы, коллоидные соединения, биогенные элементы, моющие средства, экологическая опасность.

Keywords: brewery wastewater, organic substances, suspended particles, colloidal compounds, biogenic elements, detergents, ecological hazard.

Введение

Пивоваренное производство относится к числу водоемких отраслей пищевой промышленности. Вода используется при подготовке сырья, затирании солода, получении сусла, ферментации, охлаждении, мойке технологического оборудования, санитарной обработке емкостей и розливе готовой продукции. В результате образуются производственные сточные воды сложного состава, отличающиеся значительной изменчивостью по расходу, pH и концентрации загрязняющих веществ [6,с.463;11,с.235].

Экологическая опасность сточных вод пивоваренного производства определяется не только высоким содержанием органических веществ, но и присутствием взвешенных частиц, коллоидных соединений, биогенных элементов и остаточных моющих средств. Органические вещества повышают химическое и биохимическое потребление кислорода, взвешенные частицы увеличивают мутность, а азот- и фосфорсодержащие соединения создают предпосылки для эвтрофикации водных объектов [9, с. 1; 10].

Особую проблему представляют сточные воды, формирующиеся после санитарной мойки оборудования. В их составе могут присутствовать щелочные и кислотные моющие средства, поверхностно-активные вещества и дезинфицирующие компоненты. При поступлении таких стоков на биологические очистные сооружения без предварительного регулирования pH возможно угнетение микробного сообщества активного ила и снижение эффективности биологической очистки [4; 7].

В современных условиях для оценки экологической безопасности пивоваренных предприятий необходимо анализировать не отдельный показатель загрязнения, а совокупность факторов, определяющих воздействие сточных вод на природные и искусственные водные системы. К таким факторам относятся ХПК, БПК, содержание взвешенных веществ, мутность, pH, содержание азота и фосфора, а также остаточные концентрации моющих средств [4; 5].

Цель исследования — оценить экологическую опасность органических веществ, взвешенных частиц, коллоидных соединений, биогенных элементов и моющих средств в сточных водах пивоваренного производства и предложить технологическую схему их поэтапного снижения.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи: систематизировать основные источники образования загрязняющих компонентов; определить характер их экологического воздействия; оценить относительный уровень опасности каждой группы загрязнителей; обосновать последовательность технологических стадий, направленных на снижение экологической нагрузки сточных вод.

Материалы и методы

Объектом исследования являются производственные сточные воды пивоваренных предприятий, формирующиеся при переработке солода, ферментации, фильтрации, мойке оборудования, санитарно-дезинфекционной обработке и техническом обслуживании производственных помещений. В отличие от коммунальных стоков, такие воды характеризуются выраженной неравномерностью состава, что обусловлено цикличностью технологических операций и периодичностью санитарной мойки [6, с. 463; 12, с. 4363].

Методологической основой исследования служил компонентный подход, при котором загрязняющие вещества были разделены на пять основных групп: органические вещества; взвешенные частицы; коллоидные соединения; биогенные элементы; моющие и дезинфицирующие средства. Для каждой группы оценивались источник поступления, физико-химическое состояние в воде, влияние на очистные сооружения и потенциальное воздействие на водные объекты.

К органическим веществам отнесены остатки солода, сусла, дрожжей, белковых веществ, углеводов, спиртов и органических кислот. Их экологическая опасность оценивалась через способность повышать ХПК и БПК, а также через риск снижения концентрации растворенного кислорода при биохимическом окислении в природной водной среде [9, с. 1; 11, с. 236].

К взвешенным частицам отнесены остатки сырья, частицы дрожжей, механические примеси и нерастворимые органические фрагменты. Их влияние оценивалось по способности повышать мутность, формировать донные отложения и ухудшать световой режим водной среды. Коллоидные соединения рассматривались как наиболее трудновыделяемая фракция, поскольку они сохраняют дисперсную устойчивость и плохо удаляются при обычном отстаивании [8, с. 475; 12, с. 4365].

Биогенные элементы представлены соединениями азота и фосфора, поступающими с остатками сырья, дрожжевыми клетками и моющими растворами. Их опасность оценивалась с позиции возможного усиления эвтрофикации. Моющие средства анализировались как фактор изменения pH и потенциального токсического воздействия на микробные сообщества биологических очистных сооружений [5; 7].

Для качественной оценки экологической опасности использована градация: низкая, средняя, средне-высокая и высокая. Уровень опасности устанавливался по совокупности признаков: влияние на кислородный режим, способность повышать мутность, устойчивость к механическому удалению, риск эвтрофикации, токсическое воздействие на микроорганизмы и усложнение дальнейшей очистки.

С целью практического обоснования мер снижения экологической опасности разработана поэтапная технологическая схема очистки, включающая сбор и усреднение сточных вод, механическое отделение примесей, регулирование pH, коагуляцию, флокуляцию, отстаивание, фильтрацию, биологическую очистку и сорбционную доочистку. Такой подход соответствует современным представлениям о необходимости сочетания физико-химических и биологических методов при очистке пищевых промышленных стоков [4; 5; 7].

Результаты и обсуждение

Экологически опасные компоненты в сточных водах пивоваренного производства образуются на различных стадиях технологического процесса. При подготовке сырья и переработке солода в сточные воды поступают органические вещества, углеводы и взвешенные частицы. На стадиях ферментации и фильтрации увеличивается содержание остатков дрожжей, белковых соединений и коллоидных частиц. В процессе мойки оборудования и санитарной обработки в состав сточных вод попадают щелочные, кислотные и поверхностно-активные моющие средства.

В результате указанных процессов сточные воды пивоваренного производства характеризуются повышенными значениями ХПК и БПК, высокой мутностью, коллоидной устойчивостью, наличием биогенных элементов и изменчивостью pH. При сбросе таких вод в природные водные объекты без достаточной очистки возможно развитие кислородного дефицита, эвтрофикации, образования донных отложений и нарушения микробиологического равновесия водной среды [10; 11, с. 235].

Органические вещества являются наиболее значимой группой загрязнителей. Их источниками являются остатки солода, сусла, дрожжей, сахаров, белков, спиртов и органических кислот. При биохимическом разложении органики активно расходуется растворенный кислород, что приводит к ухудшению условий существования гидробионтов. Поэтому органическая нагрузка сточных вод пивоваренного производства относится к группе высокой экологической опасности [4; 9, с. 1].

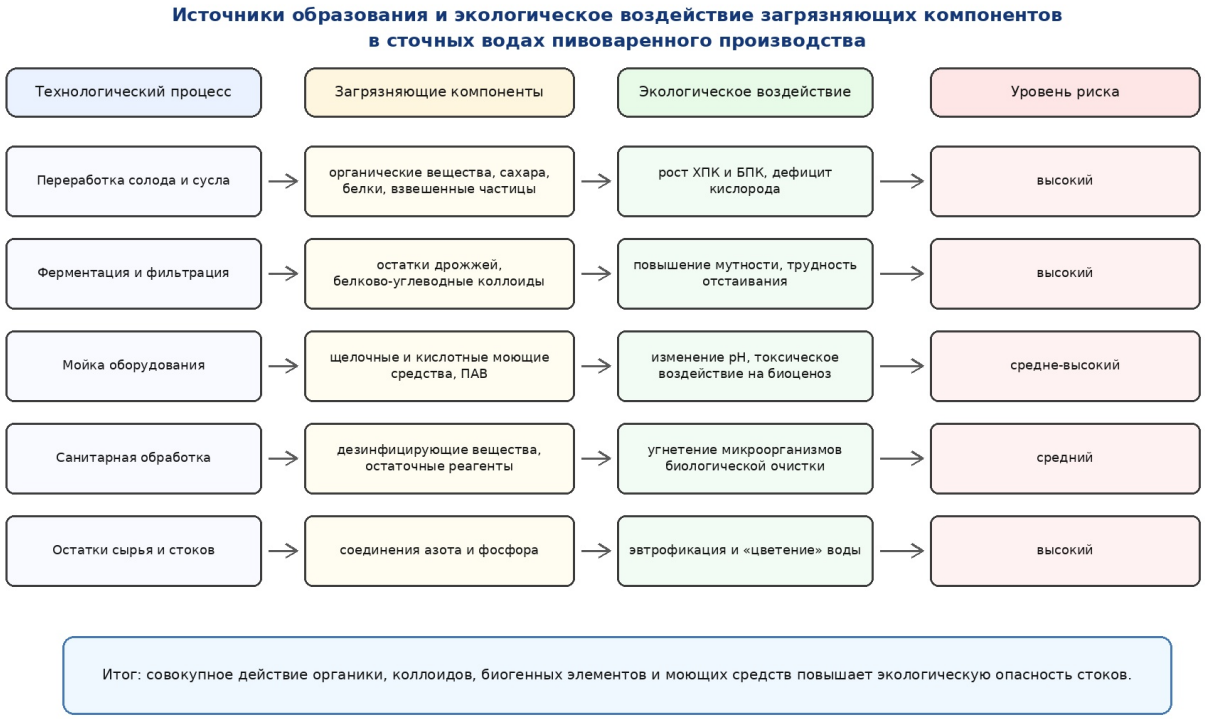


Рисунок 1. Источники образования экологически опасных компонентов в сточных водах пивоваренного производства и направления их воздействия

Как показано на рисунке 1, экологическая опасность сточных вод пивоваренного производства формируется под воздействием нескольких факторов. Органические вещества увеличивают потребление кислорода в воде, взвешенные частицы снижают прозрачность водной среды, а коллоидные соединения не удаляются полностью при обычном механическом отстаивании. Биогенные элементы усиливают процессы эвтрофикации, а остатки моющих средств могут оказывать отрицательное влияние на микроорганизмы, участвующие в биологической очистке.

Взвешенные частицы повышают мутность и создают условия для образования донных отложений. При накоплении органических взвесей в осадке усиливаются анаэробные процессы, сопровождающиеся появлением неприятного запаха и вторичным загрязнением. В условиях природного водоема увеличение мутности также снижает проникновение света в толщу воды и ухудшает условия фотосинтеза водных растений.

Коллоидные соединения представляют особую технологическую проблему. Они образуются за счет белково-углеводных комплексов, тонкодисперсных органических частиц и продуктов распада дрожжевых клеток. Из-за малого размера и электрической устойчивости такие частицы плохо осаждаются без предварительной коагуляции. Поэтому наличие коллоидной фракции повышает экологическую опасность стоков и одновременно усложняет технологию очистки [8, с. 475; 12, с. 4367].

Биогенные элементы, прежде всего соединения азота и фосфора, способны стимулировать развитие водорослей и фитопланктона. При поступлении таких соединений в водные объекты возрастает риск эвтрофикации, сопровождающейся «цветением» воды, накоплением органической биомассы и последующим дефицитом кислорода при ее разложении [4; 10].

Моющие и дезинфицирующие средства поступают в стоки при санитарной обработке оборудования, трубопроводов и емкостей. Их опасность связана с резким изменением pH, присутствием поверхностно-активных веществ и возможным токсическим влиянием на микробные сообщества. При отсутствии предварительного регулирования pH такие стоки могут снизить эффективность биологической очистки, поскольку активный ил чувствителен к резким колебаниям кислотности [7; 3].

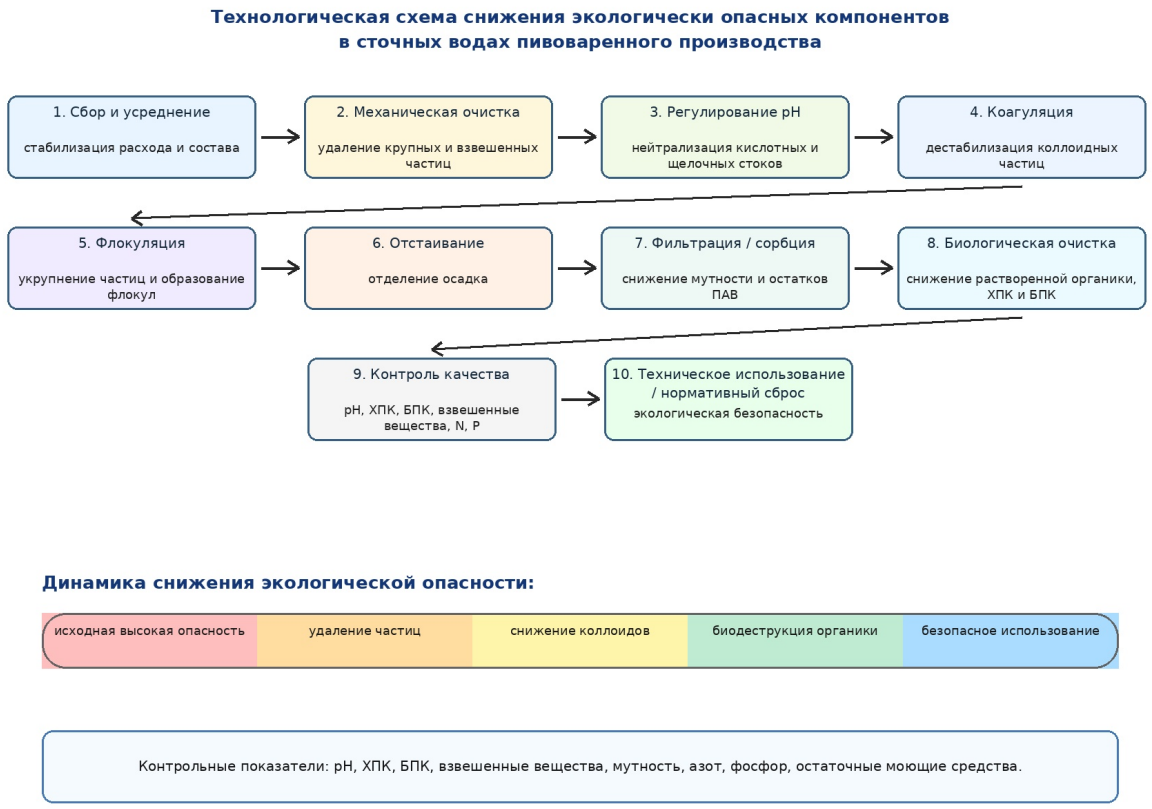


Рисунок 2. Технологическая схема снижения экологически опасных компонентов в сточных водах пивоваренного производства

Представленная технологическая схема позволяет последовательно снижать основные факторы экологической опасности сточных вод пивоваренного производства. На первом этапе сточные воды собираются в специальном резервуаре и подвергаются усреднению. Данный этап уменьшает резкие колебания состава и расхода сточных вод, обеспечивая стабильность последующих процессов очистки.

На стадии механической очистки удаляются крупные частицы, остатки сырья, солода и дрожжей. Этот процесс может осуществляться с использованием решеток, песколовок или механических фильтров. В результате снижается первичная мутность воды и уменьшается механическая нагрузка на последующие стадии очистки.

На этапе регулирования pH кислотная или щелочная реакция среды, вызванная остатками моющих средств, доводится до оптимального значения. Это имеет важное значение для эффективности коагуляции и биологической очистки. При резком отклонении pH снижается действие коагулянтов и подавляется активность микроорганизмов, участвующих в разложении органических веществ.

Коагуляция направлена на дестабилизацию коллоидных и мелкодисперсных частиц. Для этого могут применяться коагулянты на основе солей железа или алюминия. Под действием коагулянтов происходит нейтрализация электрического заряда коллоидных частиц, после чего они способны объединяться в более крупные агрегаты [5; 8, с. 475].

На стадии флокуляции с применением полимерных флокулянтов мелкие агрегаты превращаются в крупные хлопьевидные образования — флокулы. Это ускоряет процесс отстаивания и повышает эффективность удаления взвешенных и коллоидных веществ из сточных вод [12, с. 4364].

В процессе отстаивания сформированные флокулы отделяются в виде осадка. Осадок может содержать органические вещества, остатки дрожжей, гидроксиды коагулянтов и механические примеси. Поэтому сгущение, обезвоживание и безопасная утилизация осадка должны рассматриваться как обязательная часть общей технологической схемы [4; 2, с. 51].

Биологическая очистка обеспечивает разложение растворенных органических веществ с участием микроорганизмов. Данный этап способствует существенному снижению ХПК и БПК. Если после биологической очистки в воде сохраняются остатки моющих средств, окрашенные органические соединения или специфический запах, целесообразно использовать сорбционную доочистку [7; 10].

Таблица 1. Загрязняющие компоненты сточных вод пивоваренного производства и процессы их снижения

Загрязняющий компонент	**Основной источник**	**Экологическая опасность**	**Уровень опасности**	**Процесс снижения**
Органические вещества	солод, сусло, дрожжи, белки, углеводы	рост ХПК и БПК, кислородный дефицит	высокий	биологическая очистка, сорбция
Взвешенные частицы	остатки сырья, механические примеси	мутность, донные отложения	средне-высокий	механическая очистка, отстаивание
Коллоидные соединения	белково-углеводные комплексы	затруднение отстаивания, снижение эффективности очистки	высокий	коагуляция, флокуляция
Биогенные элементы	соединения азота и фосфора	эвтрофикация, «цветение» воды	высокий	биологическая очистка, реагентное осаждение
Моющие средства	щелочные, кислотные и ПАВ-содержащие растворы	изменение pH, токсическое влияние на микроорганизмы	средне-высокий	регулирование pH, сорбция, биологическая очистка

Как видно из таблицы 1, для каждой группы загрязняющих компонентов требуется определенный механизм очистки. Механическая очистка снижает содержание взвешенных частиц, но практически не влияет на растворенные органические вещества и устойчивые коллоидные соединения. Коагуляция и флокуляция эффективно удаляют коллоидные примеси, однако для разложения растворенных органических веществ необходима биологическая очистка. Поэтому для сточных вод пивоваренного производства наиболее рациональной является комбинированная технологическая схема, в которой отдельные стадии взаимно дополняют друг друга.

Заключение

Сточные воды пивоваренного производства относятся к экологически значимым промышленным стокам, поскольку содержат органические вещества, взвешенные частицы, коллоидные соединения, биогенные элементы и остаточные моющие средства. Совокупное действие этих компонентов приводит к повышению ХПК и БПК, увеличению мутности, риску эвтрофикации, изменению pH и нарушению биологической устойчивости очистных сооружений.

Наиболее высокий уровень экологической опасности характерен для органических веществ, коллоидных соединений и биогенных элементов. Органические вещества вызывают расход растворенного кислорода, коллоидные соединения осложняют механическое удаление загрязнений, а азот- и фосфорсодержащие компоненты усиливают процессы эвтрофикации. Взвешенные частицы и моющие средства имеют средне-высокий уровень опасности, поскольку они ухудшают физическое состояние воды и могут снижать активность микроорганизмов биологической очистки.

Установлено, что эффективное снижение экологической опасности возможно только при использовании поэтапной комплексной схемы очистки. Механическая стадия необходима для удаления крупных и взвешенных частиц, регулирование pH — для нейтрализации влияния санитарных стоков, коагуляция и флокуляция — для удаления коллоидной фракции, биологическая очистка — для разложения растворенной органики, а сорбционная доочистка — для снижения остаточных моющих веществ и специфических органических примесей.

Практическое значение работы заключается в возможности использования предложенной схемы при разработке локальных очистных сооружений пивоваренных предприятий. Рекомендуется проводить регулярный мониторинг pH, ХПК, БПК, мутности, взвешенных веществ, соединений азота и фосфора, а также контролировать поступление моющих средств в производственные стоки. Внедрение комплексного подхода позволит снизить экологическую нагрузку на водные объекты, повысить устойчивость очистных сооружений и создать условия для безопасного сброса или технического повторного использования очищенной воды.

Список литературы

1. Воронов Ю.В., Яковлев С.В. Водоотведение и очистка сточных вод. Москва, Издательство Ассоциации строительных вузов. – 2006. – 704 с.
2. Мухамедов К.Г., Насирова Н.К., Мухамедов Ж.К., Абдурахманов О.Х. Очистка сточных вод гальванических производств реагентным методом. Universum: технические науки. 2023. № 7(112). С. 51–56.
3. Тукташева Е.Ю. Исследование эффективности предварительной реагентной обработки сточных вод пивоваренного производства. Градостроительство и архитектура. 2021. Т. 11. № 3. С. 56–61. DOI: 10.17673/Vestnik.2021.03.09.

4. Ashraf A., Ramamurthy R., Rene E.R. Wastewater treatment and resource recovery technologies in the brewery industry: Current trends and emerging practices. Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2021. Vol. 47. Article 101432. DOI: 10.1016/j.seta. 2021.101432.
5. Carnevale Miino M., Torretta V., Repková M., Hlavínek P., Telek J. Treatment of a Real Brewery Wastewater with Coagulation and Flocculation: Impact on Organic Substance and Nutrient Concentrations. Applied Sciences. 2025. Vol. 15. No. 6. Article 2999. DOI: 10.3390/ app15062999.
6. Fillaudeau L. Blanpain-Avet P., Daufin G. Water, wastewater and waste management in brewing industries // Journal of Cleaner Production. – 2006. – № 2006. – P. 463–471. – DOI: 10.1016/ j.jclepro.2005.01.002.
7. Garomsa F.S., Berhanu Y.M., Desta W.M., Bidira F. Indigenous bio-coagulant assisted electrocoagulation process for the removal of contaminants from brewery wastewater: Performance evaluation and response surface methodology optimization. Heliyon. 2024. Vol. 10. No. 22. Article e40394. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e40394.
8. Li J., Xiao Z., Gu J., Yang Z., Dong W., Liu Y., Xu Z., Zhu W. Brewery wastewater as an alternative external carbon source for full-scale municipal wastewater treatment plants: A performance, cost, and environmental assessment // Journal of Water Process Engineering. – 2025. – DOI: 10.1016/j.jwpe.2025.107483.
9. Olajire A.A. The brewing industry and environmental challenges // Journal of Cleaner Production. – 2012. – № 2012. – P. 1–21. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.03.003.
10. Shumbe T., Angassa K., Tessema I., Tibebu S., Abewaa M., Getu T. Performance evaluation of a brewery wastewater treatment plant: A case of Heineken Brewery, Addis Ababa, Ethiopia. Heliyon. 2024. Vol. 10. No. 23. Article e40719. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e40719.
11. Simate G.S., Cluett J., Iyuke S.E., Musapatika E.T., Ndlovu S., Walubita L.F., Alvarez A.E. The treatment of brewery wastewater for reuse: State of the art. Desalination. 2011. Vol. 273. No. 2–3. P. 235–247. DOI: 10.1016/j.desal.2011.02.035.
12. Teh C.Y., Budiman P.M., Shak K.P.Y., Wu T.Y. Recent advancement of coagulation-flocculation and its application in wastewater treatment. Industrial & Engineering Chemistry Research. 2016. Vol. 55. No. 16. P. 4363–4389. DOI: 10.1021/acs.iecr.5b04703.

References

1. Voronov Yu.V., Yakovlev S.V. [Water disposal and wastewater treatment]. Moscow, Izdatelstvo Assotsiatsii stroitelnykh vuzov Publ., 2006. 704 P. (In Russ.).
2. Mukhamedov K.G., Nasirova N.K., Mukhamedov J.K., Abdurakhmanov O.H. [Reagent treatment of wastewater from electroplating industries]. Universum: tekhnicheskie nauki, 2023, no. 7(112), P. 51–56. 3. [Study of efficiency of pre-reagent treatment of wastewater from brewery]. Gradostroitelstvo i arkhitektura, 2021, vol. 11, no. 3, P. 56–61. DOI: 10.17673/ Vestnik.2021.03.09. (In Russ.). (In Russ.).

3. Ashraf A., Ramamurthy R., Rene E.R. Wastewater treatment and resource recovery technologies in the brewery industry: Current trends and emerging practices. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2021, vol. 47, article 101432. DOI: 10.1016/j.seta.2021.101432.
4. Carnevale Miino M., Torretta V., Repková M., Hlavínek P., Telek J. Treatment of a Real Brewery Wastewater with Coagulation and Flocculation: Impact on Organic Substance and Nutrient Concentrations. Applied Sciences, 2025, vol. 15, no. 6, article 2999. DOI: 10.3390/app15062999.
5. Fillaudeau L. Blanpain-Avet P., Daufin G. Water, wastewater and waste management in brewing industries // Journal of Cleaner Production. – 2006. – No. 5. – P. 463–471. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2005.01.002.
6. Garomsa F.S., Berhanu Y.M., Desta W.M., Bidira F. Indigenous bio-coagulant assisted electrocoagulation process for the removal of contaminants from brewery wastewater: Performance evaluation and response surface methodology optimization. Heliyon, 2024, vol. 10, no. 22, article e40394. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e40394.
7. Li J., Xiao Z., Gu J., Yang Z., Dong W., Liu Y., Xu Z., Zhu W. Brewery wastewater as an alternative external carbon source for full-scale municipal wastewater treatment plants: A performance, cost, and environmental assessment // Journal of Water Process Engineering. – 2025. – DOI: 10.1016/j.jwpe.2025.107483.
8. Olajire A.A. The brewing industry and environmental challenges // Journal of Cleaner Production. – 2012. – P. 1–21. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.03.003.
9. Shumbe T., Angassa K., Tessema I., Tibebu S., Abewaa M., Getu T. Performance evaluation of a brewery wastewater treatment plant: A case of Heineken Brewery, Addis Ababa, Ethiopia. Heliyon, 2024, vol. 10, no. 23, article e40719. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e40719.
10. Simate G.S., Cluett J., Iyuke S.E., Musapatika E.T., Ndlovu S., Walubita L.F., Alvarez A.E. The treatment of brewery wastewater for reuse: State of the art. Desalination, 2011, vol. 273, no. 2–3, P. 235–247. DOI: 10.1016/j.desal.2011.02.035.
11. Teh C.Y., Budiman P.M., Shak K.P.Y., Wu T.Y. Recent advancement of coagulation-flocculation and its application in wastewater treatment. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2016, vol. 55, no. 16, P. 4363–4389. DOI: 10.1021/acs.iecr.5b04703.

Статья поступила в редакцию: 13.10.2026
Статья принята к публикации: 20.10.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 622.24+622.349.5

DOI: 10.32743/UniTech.2026.151.10.23594

Разработка технологии предотвращения поглощения растворов при бурении геотехнологических скважин на уран

Наримов Равшанбек Анарметович
PhD, доц.
Ташкентский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Ахмедов Аброр Сайидмурод угли
докторант
Ташкентский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Кадыров Нодир Абдусамикович
доц. доктор(DSc)
Ташкентский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Кадыров Абдусамик Абдувасикович
д-р техн. наук, проф.
Национальный университет Узбекистана
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: abdusamig@rambler.ru
Умаров Бахром Сманович
канд. хим. наук, доц.
Национальный университет Узбекистана
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Development of a technology to prevent solution absorption when drilling geotechnological wells for uranium

Narimov Ravshanbek Anarmetovich
PhD, Associate Professor
Tashkent State Technical University
Republic of Uzbekistan, Tashkent
Akhmedov Abror Sayidmurod
Doctoral student
Tashkent State Technical University
Republic of Uzbekistan, Tashkent
Kadyrov Nodir Abdusamikovich
Associate Professor
Doctor (DSc) Tashkent State Technical University
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Библиографическое описание: Разработка технологии предотвращения поглощения растворов при бурении геотехнологических скважин на уран // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Наримов Р.А. [и др.]. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23594

Kadyrov Abdusamik Abduvasikovich
doctor of Engineering sciences, prof., National University of Uzbekistan
Republic of Uzbekistan, Tashkent
Umarov Baxrom Smanovch
PhD, Associate Professor
National University of Uzbekistan
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

В предлагаемой статье, целью которой является разработка способов предотвращения поглощения растворов, рассматривается проблема бурения технологических скважин в сложных геологических условиях Уэбекистана. Наиболее серьёзной проблемой строительства геолого разведочных скважин на цветные металла и уран на месторождениях министерства геологии и горной металлургии Узбекистана является частичное и катастрофическое поглощение бурового раствора. Это явление характеризуется потерей циркуляции промывочной жидкости и ведет в конечном счёте к поломке бурового инструмента. На устранение поглощения раствора расходуется до 30 % времени отведённого на строительство скважин, одновременно тратиться рабочая сила, материалы и энергия.Нами осуществлена разработка двух технологий по ликвидации поглощений буровых растворов на урановых месторождений с использованием местного недефицитного органического сырья и реагентов. Первый способ устранения поглощения раствора заключается в предварительном образовании пены в зоне порового пласта. Пенообразование происходит за счёт экзотермической реакции водного раствора гидрооксида натрия с оксидом трехвалентного металла с последующей добавкой жирной кислоты хлопкового соапстока.Затем на этот пенный состав подают гелеобразный акриловый полимер.Второй способ заключается в разработке резиноподобного состава быстросхватывающей композиции против поглощения бурового растворов. Композиция состоит из раствора госсиполовой смолы в органическом растворителе, который подаётся во внутрь трубы, а в затрубное пространство подают раствор неорганического отвердитель тампона. Приводятся результаты опытно промышленных испытаний предотвращения поглощения раствора при бурении скважин на площадях компании «Наваиуран».

Abstract

This article, which aims to develop methods for preventing lost circulation, examines the problem of drilling production wells in the complex geological conditions of Uzbekistan.

The most serious issue encountered during the construction of exploration wells for non-ferrous metals and uranium at deposits managed by the Ministry of Geology and Mining-Metallurgy of Uzbekistan is the partial or catastrophic loss of drilling fluid.

This phenomenon is characterized by a loss of drilling fluid circulation and ultimately leads to the failure of the drilling equipment. Remedying fluid loss consumes up to 30 % of the time allocated for well construction, while also requiring the expenditure of labor, materials, and energy.

We have developed two technologies for arresting drilling fluid losses at uranium deposits using locally available, non-scarce organic raw materials and reagents. The first method involves the in-situ generation of foam within the porous formation zone. Foaming occurs due to the

exothermic reaction of an aqueous sodium hydroxide solution with a trivalent metal oxide, followed by the addition of fatty acids from cotton soapstock. A gel-like acrylic polymer is then applied to this foamed composition The second method involves developing a rubber-like, quick-setting composition to prevent drilling fluid loss. The composition consists of a solution of gossypol resin in an organic solvent, which is pumped into the interior of the pipe, while a solution of an inorganic plugging-material hardener is pumped into the annulus. Results are presented from pilot-scale field tests on preventing fluid loss during well drilling at the Navaiuran company's sites.

Ключевые слова: уран, скважина, буровой раствор, поглощение, композиция, полимер.
Keywords: uranium, borehole, drilling fluid, loss of circulation, composition, polymer.

Введение

Одним из наиболее сложных явлений в процессе бурения скважин является интенсивное, а в некоторых случаях и полное поглощение бурового раствора геологическим пластом. При полном поглощении количество жидкости, циркулирующей в скважину, резко уменьшается или полностью исчезает. Это затрудняет охлаждение и смазку бурового инструмента, вынос бурового раствора на поверхность, гидрофобизацию стенок скважины и контроль параметров бурового раствора

Поглощение промывочных жидкостей является серьезным видом осложнений при бурении скважин. Обычно на ликвидацию поглощений затрачивается большое количество материальных средств, энергоресурсов и времени (до 30 % общих затрат времени на строительство скважин), что снижает производительность бурения и удорожает стоимость буровых работ.

Зарубежные сервисные компании разработали широкий спектр высокоэффективных кольматирующих добавок для борьбы с поглощениями растворов. Их выбор осуществляется для каждого конкретного случая поглощения и зависит от ряда факторов – свойств горных пород поглощающих пластов, пористости, проницаемости, размера пор и трещин, величины дифференциального давления, реологических свойств раствора, способа бурения скважины и других. Такой подход к проблеме обеспечивает ее эффективное решение. Недостатком применяемых импортных кольматантов является их дефицитность и высокая стоимость.

.В процессе бурении геотехнологических скважин на урановых месторождениях Узбекистана важное значение имеют конструкция скважин, технология бурения и правильное управление гидродинамическими процессами в системе скважина-пласт. В процессе закачки рабочих растворов в пласт через геотехнологические скважины и извлечения ископаемого продукта на поверхность, основными факторами являются коллекторские свойства пласта.

Целью предлагаемой работы является разработка способа и технологии предотвращения и ликвидации катастрофического поглощения буровой жидкости при бурении скважин на уран.

Поглощение жидкости в геотехнологических скважинах урановых месторождений может быть вызвано рядом геологических и технологических факторов. В том числе:

-наличие высокопроницаемых коллекторских пластов;

-естественные разломы и тектонические нарушения;

-наличие крупных пор и каналов;

-механическое разрушение стенки скважины;

-превышение давления буровой жидкости над пластовым давлением;

-высокая фильтрация буровой жидкости;

-несоответствие состава буровой жидкости к условиям пласта.

Материалы и методы

Основной принцип управления потерями жидкости в трещиноватых пластах заключается в выборе материала, способного проникнуть в канал потерь и создать в нем устойчивый барьер. Современные исследования показывают, что адаптация размера частиц к ширине трещины и усиление связи между частицами являются важными факторами снижения потерь жидкости.

Исследования по данной проблеме выполнены нами согласно научного договора между национальным университетом Узбекистана и ГП «НавоиУран на тему «Технология получения и применения олигомерной композиции против катастрофического поглощения раствора при бурении геотехнологических скважин на урановых месторождениях».

Существующие технологии борьбы с поглощением бурового раствора отличаются сложной техникой исполнения с низкой эффективностью, связанной со значительными материальными и трудозатратами.

Результаты и обсуждение

После проведённого изучения поглощения раствора пластом его мощности, характеристики горных пород нами были разработаны две композиции тампонирующих составов и технологии их применения. Первый состав представляет собой композицию на основе анионного поверхностно активного вещества ОГС(омыленная госсиполовая смола)и акрилового гель полимера (АГП)[1-4].

Поверхностно активное вещество ОГС получаемый из отхода дистилляции жирных кислот хлопковых соапстоков, с использование гибридной солнечно-ветровой установки получения нетрадиционной энергии водорода, могут применяться самостоятельно в качестве композиции эмульсионного бурового раствора при строительстве разведочных скважин, для предотвращения поглощения[5-6]. Эмульсионный буровой раствор обладающий одновременно свойством гидрофобизации легконабухающих глинистых стенок скважин был испытан для ликвидации поглощения растворов[7]..

Исходная композиция против поглощения состоит 10 – 15 % ной водной эмульсия ОГС с добавкой стабилизатора в виде 2 – 3 % (на сухое) АГП и имеет следующие технологические параметры

Удельный вес – 1,01–1,02 г/см3

Условная вязкость – 20 – 25 секунд

Фильтрация воды из раствора-5-6 см3

Фильтрационная корка – 0,5 мм

pH – 8–9

Рарушение эмульсии при суточном отстаивании равно = 0 %

Опытно промышленные испытания были проведены на геотехнологической скважине КБ-1 площади “Кохинур” рудоуправления “Зафарабад” ГП “Навоиуран” Буровая бригада 317.

:Информация по буровой скважине

- Буровое оборудование УРБ -ЗАЗ-53; Буровая бригада №17;
- Буровой насос насос НБ-125;
- Энергия буровой установки электропитание;
- Долото ПДС Ø 215,9 мм;
- Буровые стальные трубы БТ Ø 73 мм, Замки труб ЗН-95

В период бурения геотехнологической скважины на глубине 405 метров циркуляция буровой жидкости в скважине постепенно начала снижаться, то есть выявилось катастрофичекое поглощение буровой жидкости .

После этого буровой инструмент был поднят с забоя скважины и начата подготовка эмульсионно полимерной композиции для тампонировани зоны поглощения.

Предварительно буровой снаряд размером в одну длину ведущей штанги, спустили в скважину,для проверки его вращения. Через 35 – 40 минут на глубине 415 метров прекратился выход буровой жидкости и прекратилась циркуляция буровой жидкости из скважины. Буровой инструмент поднят до устья скважины.

Первым этапом проведения тампонажных работ в скважине, было приготовление состава пенообразователя состоящего из 350 литров 15 %ного водного раствора каустической соды, 50 кг катализатора в виде оксида алюминия и 600 кг дистилированной жирной кислоты хлопковых соапстоков.

Буровая труба была опущена на глубину 10 метров, через нее нагнеталися компоненты пенообразующего состава, приготовленного в специальном мини реакторе..

Послк 15 минутного ожидания, пока произойдет химическое взаимодействие, и появления пены, которая вышла в устье скважины, мы убедились, что в зоне поглощения произошла сильная экзотермическая химическая реакция. **Зете в скважину был закачен эмульсионно полимерный раствор состящий из реагентов ОГС и АГП.**

С целью повышения вязкости тампонирующего эмульсионного раствора в него добавиляли от 10 кг до 20 кг сухого акрилового гелеобразного полимера, а с устья скважины был прокачан буферный глинистый раствор с плотностью 1,2 г/см3 в количестве около 1 $м^{3,}$ содержащий добавочно 100 кг гипса в виде отвердителя .

При выполнении этих операций поток буровой жидкости из внешней стороны колонны буровых труб вышел на устье скважины .

Отдельные комки гипсового отвердителя выплыли на поверхность, так как процесс пенобразования полностью исчез. Затем был запущен буровой насос и через ведущую трубу на глубину 10 метров была начата циркуляция бурового раствора. .

Для снижения риска заклинивания бурильных труб приступили к спуску утяжеленных бурильных труб с трехшарошечным долотом на конце. Процесс бурения скважины продолжалось для определения эффективности действующей эмульсионно полимерной композиции. После достижения глубины 473 метров при непрерывной циркуляция буровой жидкости был успешно открыт продуктивный горизонт.

Опытно промышленные испытания данного способа показали, чтов процессе бурения с глубины 415 метров до глубины 473 метров циркуляция буровой жидкости в скважине была интенсивной. Выявлено, что. после второго этапа тампонажа поглощающего пласта, наблюдалась перегрузка оборудования и повышение условной вязкости буровой жидкости сверх требуемого показателя.

Анализ геологической информации показал, что в этих интервалах нет новых зон поглощения и что на этом месторождении на глубине 473 м имеется урановая рудная зона и нами достигнут положительного результат по ликвидации поглолщения[8-10]..

Вторым способом предотвращения поглощения является разработка состава быстросхватывающей тампонирующей смеси (БСС) на масложировых отходов с одновременной разработкой технологии его применения при бурении скважин в зоне поглощения.

БСС представляет собой композицию, состоящую из олигомера в виде раствора кубового остатка процесса дистилляции жирных кислот хлопкового соапстока (ДЖК ХС) в органическом растворителе и раствора отвердителя.

Для решения этой проблемы согласно календарного плана научных исследований предусматривается выполнение следующих задач:

- разработка состава БСС на основе подбора основных его компонентов из вторичных продуктов масложировых (Катта-курганский масложиркомбинат) и химических заводов (Шуртанский газохимкомплекс-ШГХК). Проведения физико-химических исследований КО ДЖК и ксилол содержащих отходов ШГХК;

- определение основных параметров и условий синтеза БСС, получаемого из КО ДЖК и ксилол содержащих отходов ШГХК (температура, время, соотношения основных компонентов, их концентрация);

- разработка технологической схемы пилотной установки по получению олигомера и его монтаж;

- разработка временного технологического регламента на производство олигомера;

- отработка технологического режима и производство 1000 кг олигомера на опытно-промышленной установке. Изучение его физико-химических и технологических свойств;

- проведение опытно-промышленных испытаний БСС в зоне катастрофического поглощения бурового раствора на одной из геотехнологических скважин ГП «НавоиУран».

Установлено,что КО ДЖК – это сложная смесь высокомолекулярных предельных и непредельных жирных кислот с продуктами переработки, а также полимеризации и поликонденсации госсипола, состоящего из бинафтильных колец, содержащих гидроксильные и карбоксильные группы. Полифункциональность КО ДЖК делает его весьма активной в химическом отношении, способной к внутри и межмолекулярным взаимодействиям, к процессам сшивки под воздействием различных катализаторов и температуры с образованием двухмерных пленок. **.**

Нами подобран основной компонент БСС – КО ДЖК, отход масложирового производства. За счет использования ксилол содержащего отхода в составе органического растворителя олигомера сокращается стадия компаундирования предельных и непредельных жирных кислот КО ДЖК с растворителем.

Быстросхватывающая композиция состоит из двух составов: первый включает олигомер в виде кубового остатка ДЖК хлопковых соапстоков и органический растворитель (ксилолсодержащий отход ШГХК) взятых в соотношении70:30 . Второй состав представляет собой раствор негашёной извести 15 % ной концентрации

Предлагаемая рецептура БСС позволяет отказаться от применения дефицитного углеводород содержащего органического компонента уайт-спирита (растворитель олигомера). Нами впервые выявлен один из возможных механизмов оксиполимеризации кислородсодержащих соединений входящих в состав КО ДЖК, изучены условия образования олигомерного соединения. Впервые подобран отвердитель в виде раствора оксида кальция, который при взаимодействии с раствором олигомера образует быстросхватывающую тампонирующую поры продуктивного пласта смесь . На основании изучения механизма и условий реакции отверждения при взаимодействии олигомера и отвердителя предлагается рациональная и эффективная технология получения БСС.

Предварительное изучение технологических свойств БСС показывает, что он аналогичен а по некоторым параметрам превосходит известные БСС приготовленные из синтетических смол (фенолформальдегидных, а также меламино - и резорцино-формальдегидных). Предлагаемая технология получения тампонирующего состава для устранения поглощения бурового раствора на геотехнологических скважинах при бурении на золото и другие драгметаллы отличается следующими преимуществами:

- использование недефицитного, доступного местного сырья – вторичных отходов масложирового и химического производств;

- простота технологии синтеза быстро схватывающей смеси, его низкая цена;

- простота технологии его применения при ликвидации поглощения бурового раствора в зонах осложнений бурения скважин на золото и другие благородные металлы;

- из-за отсутствия в составе БСС импортных компонентов обеспечивается экономия валютных средств;

- обеспечение качественного тампонирования зоны поглощения и ликвидация аварийной ситуации при бурении геотехнологических скважин, снижение себестоимости буровых работ;

- утилизация отходов производства на масложиркомбинатах республики и Шуртанском газохимкомплексе, улучшение экологической обстановки в республике.

Опытно промышленные испытания были проведены на площади Тувактау Зирабулакской геологоразведочной экспедиции (ГРЭ) ГП Навоиуран.

Исходные данные по скважине, где проводились опытно промышленные испытания:

Проектная глубина – 350 – 400 м

Тип буровой установки – БА-15

Способ бурения – роторное вращательное бурение

Диаметр бурения – 215 мм

Тип насоса — НБ-32

Суть предлагаемой технологии ликвидации поглощения заключается в следующем. через «голый конец» бурильной колонны трубы (через специальные отверстия диаметром 5 мм на расстоянии 2-3м от конца колонны труб), которая находится напротив зоны поглощения, подается раствор олигомера в ксилолсодержащем растворе ,

а в «затрубье»(в заколонное пространство) под давлением насосом прокачивается раствор негашённой извести . Два раствора встречаются напротив зоны поглощения и образуют тампон в виде резиноподобной быстросхватывающей композиции, которая закрывает зону поглощения.

Заключение

1. Разработана технология применения и состав эмульсии ПАВ и гелеобразного акрилового полимера против катастрофического поглощения буроых растворов при бурении геотехнологических скважин на урановом месторождении площади Тувактау в Зирабулакском ГРЭ ГП “Навоиуран” .

2. Осуществлено производственное испытание быстросхватывающей композиции олигомера в виде кубового остатка ДЖК ХС в ксилолсодержащем растворителе взятых в соотношении70:30, которая при встрече в зоне поглощения с раствором негашёной извести образует тампонирующую резиноподобной смесь перекрывающую поры пласта геотехнологических скважин на площади Кохинур рудоуправления Зафарабад ГП «Навои уран»

Список литературы

1. Artykova, Zh. K. The study applied characteristic polymeric stabilizer / Zh. K. Artykova, O.K. Beysenbayev // Proceed. 7th Internat. Conf. «Industrial Technologies and Engineering» (ICITE–2020). – 2020. – P. 56–58.
2. Beysenbayev, O.K. Synthesis and research of some physical and chemical properties of polyelectrolyte surfaces / O.K. Beysenbayev, Zh. K. Artykova, A.B. Issa [et al.] // Proceed. 6th Internat. Annual Conf. «Industrial Technologies and Engineering» (ICITE–2019). – 2019. – P. 22–29.
3. Artykova, Zh. K. Synthesis and preparation polyacrylonitrile and vinyl sulfonic acid in the presence of gossypol resin for drilling fluids / Zh. K. Artykova, O.K. Beisenbayev [et al.] // Rasayan Journal of Chemistry. – 2023. – T. 16, № 4. – P. 2313–2320.
4. Maxkamov, R.R. Colloid-chemical properties and efficiency of new surfactants for disperse systems equilibration / R.R. Maxkamov, A.E. Kurbanbaeva, Sh. K. Samandarov [et al.] // British Journal of Global Ecology and Sustainable Development. – 2022. – T. 4. – P. 88–94.
5. Alikhanov, B.A. The new Paradigm of Energy Security (Hydrogen) / B.A. Alikhanov // Annals of R.S.C.B. – 2021. – T. 25, № 3. – P. 4842–4851. URL: http://annalsofrscb.ro/index.php/journal/article/view/1989/1663 (дата обращения: 20.10.2026).
6. Abdullaev, A. Energy security paradigm: hydrogen is the main energy carrier of the XXI century / A. Abdullaev, R. Isaev, Z. Iskandarov // European Journal of Research. – 2023. – T. 8, № 3. – P. 26–45. URL: https://journalofresearch.eu/ (дата обращения: 20.10.2026).
7. Кадыров, А.А. Поверхностно-активные вещества (получение, свойства, применение): монография / А.А. Кадыров, Н.А. Кадыров. – Ташкент: Ташгостехуниверситет, 2015. – 116 с.

8. Булатов, А.И. Бурение нефтяных и газовых скважин: учебник / А.И. Булатов. – Москва: Недра, 2001. – 196 с.
9. Рябченко, В.И. Управление свойствами буровых растворов: монография / В.И. Рябченко. – Москва: Недра, 1990. – 130 с.
10. Рязанов, Я.А. Энциклопедия по буровым растворам / Я.А. Рязанов. – Москва: Недра, 2004. – 186 с.

References

1. Artykova Zh.K., Beysenbayev O.K. The study applied characteristic polymeric stabilizer // Proceed. 7th internat. conf. «Industrial Technologies and Engineering» (ICITE. – 2020. – P. 56–58.
2. Beysenbayev O.K., Artykova Zh.K., Issa A.B. et al. Synthesis and research of some physical and chemical properties of polyelectrolyte surfaces // Procced. 6th internat. annual conf. “Industrial Technologies and Engineering” (ICITE – 2019).- Shymkent, 2019. – P.22–29. 3Artykova Zh.K., Beisenbayev O.K. et al. Synthesis and preparation polyacrylonitrile and vinyl sulfonic acid in the presence of gossypol resin for drilling fluids // Rasayan Journal of Chemistry. – 2023. – Vol. 16(4).- P.2313–2320.
3. Maxkamov R.R. Kurbanbaeva A.E. Samandarov Sh.K. Saidkulov F.R. Nurmanova M.L., Saidaxmedova X.R., Xolmo‘minova D.A. Colloid-chemical properties and efficiency of new surfactants for disperse systems equilibration // British Journal of Global Ecology and Sustainable Development Volume-04, SJIF. – 2022.
4. Alikhanov B.A. Alikhanov B,A. “The new Paradigm of Energy Security (Hydrogen)”, Annals of R.S.C.B., ISSN:1583–6258, 2021, Accepted 08 March 2021 Romania, Buxarest // Annals of R.S.C.B. – 2021. – Vol. 25, No. 3. – P. 4842–4851. – URL: http://annalsofrscb.ro/index.php/journal/article/view/1989/1663 (accessed: 22.10.2026).
5. Abdullaev A., Isaev R. IskandarovZ/ «Energy security paradigm: hydrogen is the main energy carrier of the XXI century», European Journal of Research volume 8 issue 3 2023 pages 26–45 ISSN 2521–3261 ISSN 2521–3253 (Print) of research.eu/ 26 [Электронный ресурс]. – P. 26–45. – URL: https://journal (accessed: 22.10.2026).
6. Kadyrov A.A., Kadyrov N.A. Surfactants (Production, Properties, Application) // Monograph, Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan. – 2015. – 116 P.
7. Bulatov A.I. Drilling of Oil and Gas Wells (Textbook) // Nedra, Moscow, Russia. – 2001.
8. Ryabchenko V.I. Management of Drilling Fluids (Monograph) // Nedra, Moscow, Russia. – 1990.
9. Ryazanov Ya.A. Encyclopedia of Drilling Fluids // Nedra, Moscow, Russia. – 2004.

Статья поступила в редакцию: 20.09.2026
Статья принята к публикации: 26.09.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 665.7+542.8

Исследование кинетики разделения водомасляной эмульсии отработанного масла под влиянием деэмульгатора «КХД-М-1» и температурного фактора

Негматов Сайибжан Садыкович
научный руководитель Государственного учреждения Фан ва тараккиёт Ташкентский государственный технический университет, акад. АН РУз, Заслуженный деятель науки Республики Узбекистан
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Исмаилов Равшан Исраилович
д-р хим. наук, проф.
Ташкентский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Негматова Комила Сайибжановна
д-р техн. наук, проф.
Государственного учреждения Фан ва тараккиёт при Ташкентский государственный технический университет, зав. лаб. Механохимическая технология композитов и химических реагентов
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Раупова Дилфуза Нуруллаевна
научный сотрудник, PhD
Государственного учреждения Фан ва тараккиёт Ташкентский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: fan_va_taraqqiyot@mail.ru
Мусабеков Дилшод Хакимович
научный сотрудник, PhD
Государственного учреждения Фан ва тараккиёт при Ташкентский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Study of the separation kinetics of a water–oil emulsion of used oil under the influence of the demulsifier “KHD-M-1” and temperature

Negmatova Komila
Head of Laboratory Mechanochemical Technology of Composites and Chemical Reagents, Doctor of Technical Sciences, Professor, State Institution Fan va Tarakkiyot, Tashkent State Technical University
Republic of Uzbekistan, Tashkent
Ismailov Ravshan
Doctor of Chemical Sciences, Professor
Tashkent State Technical University
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Библиографическое описание: Исследование кинетики разделения водомасляной эмульсии отработанного масла под влиянием деэмульгатора «КХД-М-1» и температурного фактора // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Негматов С.С. [и др.]. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23487

Negmatova Komila
Head of Laboratory Mechanochemical Technology of Composites and Chemical Reagents, Doctor of Technical Sciences, Professor, State Institution Fan va Tarakkiyot, Tashkent State Technical University
Republic of Uzbekistan, Tashkent
Raupova Dilfuza
Researcher, PhD
State Institution Fan va Tarakkiyot, Tashkent State Technical University
Republic of Uzbekistan, Tashkent
Musabekov Dilshod
Researcher, PhD
State Institution Fan va Tarakkiyot, Tashkent State Technical University
Republic of Uzbekistan, Tashkent
Negmatov Sayibjan
scientific Supervisor, State Institution Fan va Tarakkiyot Tashkent State Technical University
Academician of the Academy of Sciences of the; Honored Scientist of the Republic of Uzbekistan

Аннотация

В работе представлены результаты экспериментального исследования кинетики обезвоживания отработанного масла с применением композиционного химического деэмульгатора «КХД-М-1». Актуальность исследования обусловлена необходимостью эффективного удаления воды из отработанных масел, поскольку наличие водной фазы и устойчивых водомасляных эмульсий существенно осложняет последующие процессы очистки, регенерации и переработки нефтяного сырья и масляных отходов. Особое внимание уделено определению влияния температурного фактора и продолжительности отстаивания на интенсивность разделения водной и масляной фаз.

Целью исследования являлось установление закономерностей изменения объёма выделившейся воды во времени при обезвоживании отработанного масла с использованием деэмульгатора «КХД-М-1», а также определение рационального температурно-временного режима процесса. В качестве основного количественного показателя эффективности обезвоживания использовали объём отделившейся водной фазы, измеряемый через определённые интервалы времени.

Установлено, что при повышенной температуре практически максимальный объём отделившейся воды достигается значительно быстрее, чем при нормальной температуре. Так, через 120 мин при 50 °C было выделено 468 мл воды, тогда как при нормальной температуре за аналогичный период отделилось 400 мл. При этом после 120 мин при 50 °C прирост объёма выделившейся воды становится относительно небольшим, что указывает на приближение системы к состоянию равновесного разделения в исследованных условиях.

Abstract

This study presents the results of an experimental investigation of the dehydration kinetics of used oil using the composite chemical demulsifier “KHD-M-1”. The relevance of the study is обусловлена by the need for effective water removal from used oils, since the presence of an aqueous phase and stable water–oil emulsions significantly complicate subsequent processes of

purification, regeneration, and processing of petroleum feedstocks and oily wastes. Particular attention was paid to determining the effects of temperature and settling time on the intensity of separation of the aqueous and oil phases.

The aim of the study was to establish the patterns of change in the volume of separated water over time during the dehydration of used oil using the “KHD-M-1” demulsifier, as well as to determine a rational temperature–time regime for the process. The volume of the separated aqueous phase, measured at specified time intervals, was used as the main quantitative indicator of dehydration efficiency.

It was established that at an elevated temperature, the practically maximum volume of separated water is achieved significantly faster than at normal temperature. Thus, after 120 min at 50 °C, 468 mL of water was separated, whereas at normal temperature, 400 mL was separated over the same period. At the same time, after 120 min at 50 °C, the increase in the volume of separated water became relatively small, indicating that the system was approaching an equilibrium separation state under the studied conditions.

Ключевые слова: отработанное масло, водомасляная эмульсия, обезвоживание, деэмульгатор, «КХД-М-1», кинетика разделения.

Keywords: used oil, water–oil emulsion, dehydration, demulsifier, “KHD-M-1”, separation kinetics.

Введение

Отработанные масла являются сложными многокомпонентными системами, содержащими воду, механические примеси, продукты окисления, смолисто-асфальтеновые вещества и другие загрязняющие компоненты. Наличие воды в составе отработанного масла существенно затрудняет проведение последующих процессов очистки и переработки [6, 2].

Одной из основных стадий предварительной подготовки отработанного масла является удаление воды. При этом вода может находиться как в свободном состоянии, так и в виде диспергированных капель, стабилизированных поверхностно-активными веществами и высокомолекулярными компонентами масла. Образующиеся водомасляные эмульсии характеризуются различной устойчивостью, вследствие чего простого гравитационного отстаивания часто недостаточно для эффективного обезвоживания [9, 7].

Для интенсификации процесса разделения применяются деэмульгаторы, которые способствуют разрушению межфазной плёнки, объединению мелкодисперсных капель воды в более крупные и их последующему гравитационному осаждению [4].

В связи с этим представляет практический интерес исследование эффективности композиционного химического деэмульгатора «КХД-М-1» и определение влияния температуры на кинетику выделения воды из отработанного масла.

Цель исследования. Целью настоящей работы являлось исследование кинетики обезвоживания отработанного масла с применением композиционного деэмульгатора «КХД-М-1», а также определение влияния температуры на скорость и степень разделения водомасляной эмульсии.

Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования использовали отработанное масло, содержащее водную фазу и диспергированные загрязняющие компоненты.

Для определения содержания воды в образцах использовали метод Дина-Старка. Для определения среднего диаметра капель водной фазы промысловых водонефтяных эмульсий использовали оптическую микроскопию.

Результаты и их обсуждение. Для разрушения устойчивой водомасляной эмульсии применяли разработанный композиционный химический деэмульгатор «КХД-М-1» (композиционный химический деэмульгатор-масло). После введения деэмульгатора исследуемую систему подвергали перемешиванию, после чего проводили отстаивание [5].

Для оценки кинетики процесса через заданные промежутки времени определяли объём выделившейся воды. Исследования проводили в двух температурных режимах: при нормальной температуре; при температуре 50 °С. При нормальной температуре измерения проводили через 30, 60, 90, 120 и 150 мин, а также через 16, 18 и 24 часа. При температуре 50 °С измерения проводили через 5, 10, 20, 40, 60, 80, 100 и 120 мин.

Основным показателем процесса являлся объём отделившейся водной фазы, выраженный в миллилитрах. Результаты исследования представлены в табл. 1.

Таблица 1. Динамика выделения воды из отработанного масла при различных температурах

№	Время	30 мин	60 мин	90 мин	120 мин	150 мин	16 час	18 час	24 час
1.	Количество выделившейся воды (мл) из масла в нормальной температуры	270	340	380	400	420	455	458	460
	Время	5 мин	10 мин	20 мин	40 мин	60 мин	80 мин	100 мин	120 мин
2.	Количество выделившейся воды (мл) из масла в 50 ^{0}С	320	390	430	450	455	462	465	468

Анализ полученных данных показывает, что процесс обезвоживания отработанного масла характеризуется постепенным увеличением объёма выделившейся воды во времени.

При нормальной температуре через 30 мин объём выделившейся воды составлял 270 мл. При дальнейшем отстаивании данный показатель увеличивался до 340 мл через 60 мин, 380 мл через 90 мин, 400 мл через 120 мин и 420 мл через 150 мин. После продолжительного отстаивания объём выделившейся воды достигал 455 мл через 16 часов, 458 мл через 18 часов и 460 мл через 24 часа.

При температуре 50 °С процесс разделения протекал интенсивнее. Уже через 5 мин объём выделившейся воды составлял 320 мл, через 10 мин - 390 мл, через 20 мин - 430 мл. Через 40 мин было выделено 450 мл воды, а через 60 мин - 455 мл. В дальнейшем объём увеличивался до 462 мл через 80 мин, 465 мл через 100 мин и достигал 468 мл через 120 мин.

Таким образом, повышение температуры до 50 °C приводит к существенному ускорению процесса выделения воды. Практически максимальный объём отделившейся воды при данной температуре достигается уже через 120 мин, в то время как при нормальной температуре для достижения близкого результата требуется значительно более длительное время отстаивания.

Ускорение процесса разделения при повышенной температуре связано со снижением вязкости масляной фазы и повышением подвижности диспергированных капель воды. Это создаёт более благоприятные условия для их столкновения, коалесценции и последующего гравитационного отделения.

При этом необходимо отметить, что дальнейшее увеличение продолжительности отстаивания после достижения практически постоянного объёма отделившейся воды приводит лишь к незначительному дополнительному выделению водной фазы. Следовательно, при технологическом выборе продолжительности процесса целесообразно учитывать не только максимальный объём выделившейся воды, но и экономическую эффективность увеличения времени отстаивания.

Эффективность применения «КХД-М-1» связана с его способностью воздействовать на структуру устойчивой водомасляной эмульсии. В исходной системе мелкодисперсные капли воды окружены межфазной плёнкой, содержащей поверхностно-активные и высокомолекулярные компоненты.

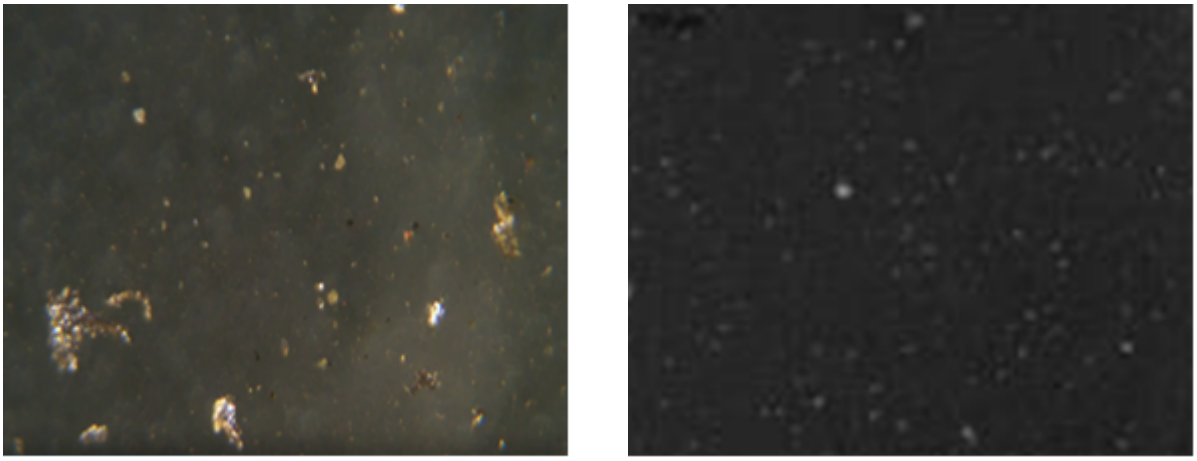
При введении деэмульгатора происходит нарушение устойчивости данной межфазной структуры. В результате уменьшается устойчивость диспергированных капель воды, создаются условия для их укрупнения и коалесценции.

Укрупнившиеся капли воды обладают большей скоростью осаждения, вследствие чего ускоряется формирование отдельного слоя водной фазы. Повышение температуры дополнительно способствует этому процессу за счёт снижения вязкости масляной среды.

Далее определяли микроскопическое исследование композиционного деэмульгатора для разрушения масляной эмульсии. Важную роль в процессе обезвоживания масло играет разрушение водомасляной эмульсии и коалесценция капель [3, 8]. Поэтому необходимо учитывать влияние химического реагента на данном этапе.

Принцип работы оптического микроскопа достаточно прост: расходящийся пучок света проходит сквозь образец, полученное изображение увеличивается объективом, преломляется для поступления в тубус окуляра, где увеличивается еще раз. После этого пучок света поступает на сетчатку глаза, формируя картинку.

Результат эффективности композиционного химического деэмульгатора приведен на рис. 1.



а б

Рисунок 1. Микроструктура отработанного масла а - до обработки; б - после обработки деэмульгатором

Разработанная лабораторная методика обработки водомасляной эмульсии с применением композиционного химического деэмульгатора «КХД-М-1» обеспечила эффективное разрушение эмульсионной структуры и интенсивное отделение водной фазы. Для визуальной оценки степени обезвоживания исследуемого масла были получены микрофотографии с использованием поляризационного микроскопа Olympus, оснащённого цифровой фотокамерой SIMAGIS XS-6CU.

Микроскопический анализ исходного и обработанного образцов позволил оценить изменение дисперсной структуры эмульсии после воздействия деэмульгатора. На микрофотографии обработанного образца, представленной на рис. 1(б), наблюдается преимущественно однородная масляная фаза с отсутствием выраженного скопления диспергированных водных капель. В отличие от устойчивой водомасляной эмульсии, в которой водная фаза находится в виде большого количества мелкодисперсных глобул, после обработки препаратом «КХД-М-1» количество визуально обнаруживаемых водных включений существенно уменьшается.

Полученный результат свидетельствует о высокой эффективности разработанной методики разрушения водомасляной эмульсии. Под действием деэмульгатора происходит нарушение устойчивости межфазных плёнок, стабилизирующих капли воды, вследствие чего создаются условия для их коалесценции и последующего гравитационного отделения от масляной фазы. В результате формируется более однородная масляная среда с существенно сниженным содержанием диспергированной воды.

Количественное определение остаточного содержания воды методом Дина–Старка показало, что после обработки содержание воды в исследуемом масле составило 0,1 % [1, 10]. Данный результат согласуется с результатами микроскопического исследования: на микрофотографии обработанного образца отдельные водные глобулы либо практически не обнаруживаются, либо присутствуют в крайне малом количестве. При этом следует учитывать, что микроскопический метод имеет преимущественно качественный характер и не позволяет исключить наличие воды в молекулярно растворённом или субмикронном состоянии. Поэтому количественная оценка остаточного содержания воды была выполнена методом Дина–Старка.

Заключение

В результате проведённого экспериментального исследования установлено влияние температуры и продолжительности отстаивания на кинетику обезвоживания отработанного масла с применением композиционного деэмульгатора «КХД-М-1».

Показано, что при нормальной температуре процесс выделения воды протекает относительно медленно и продолжается в течение длительного времени. За 24 часа объём отделившейся воды достиг 460 мл.

Повышение температуры до 50 °С значительно интенсифицирует процесс обезвоживания. Уже через 20 мин объём выделившейся воды составил 430 мл, через 60 мин - 455 мл, а через 120 мин достиг 468 мл.

Следовательно, температура 50 °С в исследованных условиях является более благоприятным режимом для ускоренного разделения водомасляной эмульсии с использованием деэмульгатора «КХД-М-1». Полученные результаты подтверждают целесообразность дальнейшей оптимизации температурно-временных параметров процесса с целью повышения эффективности обезвоживания и сокращения продолжительности технологической операции.

Результаты микроскопического анализа и количественного определения содержания воды подтверждают, что композиционный химический деэмульгатор «КХД-М-1» обеспечивает эффективное разрушение водомасляной эмульсии и глубокое обезвоживание отработанного масла.

Список литературы

1. ГОСТ 2477–2014. Нефть и нефтепродукты. Метод определения содержания воды.
2. Загидуллин С.Х., Долганов В.Л., Лыков А.Н., Киселёв А.М. Разработка нового способа термического обезвоживания минеральных масел. Химическая технология и биотехнология // Вестник ПНИПУ. – 2016. – № 4. – С. 129–137.
3. Мажидов А.Х., Шарипов К.А. Основы очистки отработанных масел. Тошкент, Фан. – 2000. – 140 с.
4. Негматов С.С., Рахимов Ю.К., Раупова Д.Н., Мусабеков Д.Х., Иногамова М.Х. Исследование механизма взаимодействия в процессе деэмульсации с выбранными реакционноспособными соединениями путем применения современных физико-химических методов. Universum: технические науки: электрон. научн. журн. Негматов С.С. [и др.]. 2024. 9(126) [Электронный ресурс]. URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/18280 (дата обращения: 21.09.2026).
5. Олдырев С.М. Контроль процесса очистки отработанного масла / С.М. Олдырев, Л.А. Нагорский // Инновации в сельском хозяйстве: электронный журнал Всероссийского научно-исследовательского института электрификации сельского хозяйства. – 2015. – № 2. – С. 149–153.
6. Цуканова Г.И., Безруков В.А., Карпова Г.В., Багдасарова О.В. Габаритный расчет и выбор компонентов оптических систем микроскопов. Учебное пособие. – Университет ИТМО. – 2015. – 92 с.

7. Цуканова Г.И., Безруков В.А., Карпова Г.В., Багдасарова О.В. Габаритный расчет и выбор компонентов оптических систем микроскопов. Учебное пособие. – Университет ИТМО. – 2015. – 92 с.
8. Яковлева Н.П., Кириченко Г.Н., Лапинг Т.П., Швец О.А. «Регенерация отработанного турбинного масла» // Энергетик. – 2003. – № 1. – С. 34–35.
9. Negmatov S.S., Abed N.S., Negmatova K.S., Raupova D.N., Ikramova M.E., Rakhimov Kh.Y., Tulyaganova V.S., Yulchieva S.B. Research of physical and chemical properties of the developed composite demulsifier based on local and secondary raw materials for destruction of petroleum emulsion. PPOR. – 2024. – T. 25, № 1. – P. 207–216. – DOI: 10.62972/1726–4685.2024.1.207.

References

1. GOST 2477 Petroleum and Petroleum Products. Method for Determination of Water Content. – 2014.
2. Zagidullin S.Kh., Dolganov V.L., Lykov A.N., Kiselev A.M. Development of a New Method for Thermal Dehydration of Mineral Oils. Chemical Technology and Biotechnology // Bulletin of PNRPU. – 2016. – No. 4. – P. 129–137.
3. Mazhidov A.Kh., Sharipov K.A. Fundamentals of Used Oil Purification. – Tashkent: Fan, 2000. – 140 P.
4. Negmatov S.S., Rakhimov Yu.K., Raupova D.N., Musabekov D.Kh., Inogamova M.Kh. Investigation of the Interaction Mechanism during Demulsification with Selected Reactive Compounds Using Modern Physicochemical Methods. Universum: Technical Sciences: Electronic Scientific Journal, 2024, Available at: [Электронный ресурс]. – No. 9 (126). – URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/18280 (accessed: 21.09.2026).
5. Oldyrev S.M., Nagorsky L.A. Control of the Used Oil Purification Process. Innovations in Agriculture: Electronic Journal of the All-Russian Research Institute for Electrification of Agriculture, 2015, No. 2, P. 149–153.
6. Tsukanova G.I., Bezrukov V.A., Karpova G.V., Bagdasarova O.V. Dimensional Design and Selection of Components of Optical Systems of Microscopes. Study Guide. ITMO University. – 2015. – 92 P.
7. Tsukanova G.I., Bezrukov V.A., Karpova G.V., Bagdasarova O.V. Dimensional Design and Selection of Components of Optical Systems of Microscopes. Study Guide. ITMO University. – 2015. – 92 P.
8. Yakovleva N.P., Kirichenko G.N., Laping T.P., Shvets O.A. Regeneration of Used Turbine Oil. Energetik, 2003, No. 1, P. 34–35.
9. Negmatov S.S., Abed N.S., Negmatova K.S., Raupova D.N., Ikramova M.E., Rakhimov Kh.Y., Tulyaganova V.S., Yulchieva S.B. Research of physical and chemical properties of the developed composite demulsifier based on local and secondary raw materials for destruction of petroleum emulsion. PPOR. – 2024. – Vol. 25, No. 1. – P. 207–216. – DOI: 10.62972/1726–4685.2024.1.207.

Статья поступила в редакцию: 16.09.2026
Статья принята к публикации: 22.09.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 620.193+622.32

DOI: 10.32743/UniTech.2026.151.10.23460

Разработка эффективных составов и исследование физико-химических свойств композиционных ингибиторов, применяемых для защиты от коррозии машин и механизмов нефтегазовых скважин

Номозов Сардор Суннатович
соискатель ГУ "Фан ва тараққиёт",
Ташкентский государственный технический университет,
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Негматова Комила Сайибжановна
зав. лаб. ГУ "Фан ва тараққиёт",
Ташкентский государственный технический университет,
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Икрамова Мукаддас Эралиевна
зав. лаб. ГУ "Фан ва тараққиёт",
Ташкентский государственный технический университет,
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: mikramova1974@mail.ru
Абед Нодира Сайибжановна
директор ГУ "Фан ва тараққиёт",
Ташкентский государственный технический университет,
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Негматов Сойибжон Садикович
научный руководитель ГУ "Фан ва тараққиёт",
Ташкентский государственный технический университет,
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Библиографическое описание: Разработка эффективных составов и исследование физико-химических свойств композиционных ингибиторов, применяемых для защиты от коррозии машин и механизмов нефтегазовых скважин // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Номозов С.С. [и др.]. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23460

Development of effective compositions and research into the physicochemical properties of composite inhibitors used for protecting machines and mechanisms in oil and gas wells from corrosion

Nomozov Sardor Sunnatovich
Candidate of the State Institution "Science and Development," Tashkent State Technical University, Republic of Uzbekistan, Tashkent
Negmatova Komila Sayibjanovna
Laboratory Manager «Fan va taraqqiyot», Tashkent State Technical University, Republic of Uzbekistan, Tashkent
Ikramova Mukaddas Eralievna
Laboratory Manager «Fan va taraqqiyot», Tashkent State Technical University, Republic of Uzbekistan, Tashkent
Abed Nodira Sayibjanovna
Director of the «Fan va taraqqiyot», Tashkent State Technical University, Republic of Uzbekistan, Tashkent
Negmatov Soyibjon Sadikovich
Scientific supervisor of the «Fan va taraqqiyot», Tashkent State Technical University, Republic of Uzbekistan, Tashkent city

Аннотация

В работе представлены результаты исследований по разработке эффективных составов и изучению физико-химических и защитных свойств импортозамещающих композиционных ингибиторов на основе местного сырья и отходов производств, позволяющих защиту от коррозии рабочих органов машин и механизмов, а также оборудований, применяемых в процессе испытаний и оценки эффективности нефтегазовых скважин. Целью исследования является разработка эффективных составов и исследование физико-химических свойств разработанных коррозионностойких композиционных ингибиторных материалов на основе местного сырья и отходов производств для защиты от коррозии машин и механизмов, применяемых в процессе испытаний и оценка эффективности нефтегазовых скважин в нефтегазовой отрасли промышленности. Установлено, что разработанные композиционные ингибирующие материалы, отвечают предъявляемым требованиям АО «Нефт ва газ кудукларини синаш» и обеспечивает надежность и долговечность металлических конструкционных материалов и оборудования нефтегазовой отрасли. Следовательно, в состав госсиполовой смолы входит примерно 20 % жирных кислот, значительную часть которых составляют ненасыщенные высокомолекулярные кислоты, а используемые для получения ингибиторов коррозии аминоспирты являются бифункциональными, при взаимодействие аминов с жирными кислотами, содержащимися в госсиполовой смоле, могут давать диапозон различных веществ, как за счет взаимодействия с основным продуктом, так и между собой и исходя из этого вещества данной группы исследовались как ингибитор коррозии. Показано, что разработанные антикоррозионные композиционные ингибиторы до

90 % защищает металлические нефтегазовые трубопроводы и конструкции от коррозии и увеличивает долговечность повышая производительность и работоспособность металлических конструкций и оборудований нефтегазовых скважин.

Abstract

The work presents research results on developing effective compositions and studying the physicochemical and protective properties of import-substituting composite inhibitors based on local raw materials and industrial waste that allow for the corrosion protection of machine and mechanism working parts, as well as equipment used in the process of testing and evaluating the efficiency of oil and gas wells. The aim of the study is to develop effective compositions and study the physicochemical properties of the developed corrosion-resistant composite inhibitory materials based on local raw materials and industrial waste for protecting machinery and mechanisms from corrosion, used in the testing process, and to evaluate the efficiency of oil and gas wells in the oil and gas industry. It has been established that the developed composite inhibitory materials meet the requirements of JSC «Neft va gaz kuduklarini sinash» and ensure the reliability and durability of metal structural materials and equipment for the oil and gas industry. Consequently, gossypol resin contains approximately 20 % fatty acids, a significant portion of which are unsaturated high-molecular-weight acids, and the amino alcohols used to obtain corrosion inhibitors are bifunctional; when amines interact with the fatty acids contained in gossypol resin, they can yield a range of different substances, both through interaction with the main product and between themselves, and based on this, this group of substances was investigated as a corrosion inhibitor. It has been shown that the developed anti-corrosion composite inhibitors protect metal oil and gas pipelines and structures from corrosion by up to 90 % and increase the durability by increasing the productivity and performance of metal structures and oil and gas well equipment.

Ключевые слова: ингибиторы, коррозия, эффективные составы, композиция, металлические конструкционные материалы, оборудования, нефтегазовая скважина.

Keywords: inhibitors, corrosion, effective compositions, composition, metal structural materials, equipment, oil and gas well.

Введение

На современном этапе развития мировой экономики металлургические отрасли промышленности занимают одно из ключевых мест, являясь одними из основных сфер, обеспечивающих развитие и устойчивое функционирование промышленных комплексов. Однако одной из наиболее важных и актуальных проблем, ограничивающих эксплуатационные возможности устройств оборудования и конструкций машин и механизмов, применяемых в процессе испытаний и оценке нефтегазовых скважин на предприятиях нефтегазовой и других отраслей промышленности, является коррозия – катастрофический процесс, возникающий в результате постепенного разрушения металлической массы. В связи с этим особое внимание уделяется выявлению причины коррозии металлических рабочих органов испытательных машин и механизмов нефтегазовой отрасли промышленности, созданию эффективных композиционных химических ингибиторов на основе местного и вторичного сырья, позволяющих эффективно защищать от

коррозии рабочие органы испытательных машин и механизмов нефтегазовой отрасли промышленности [1, 2, 3, 4, 5]. Исходя из анализа существующих работ, следует отметить, что при разработке коррозионностойких композиционных полимерных и ингибиторных материалов для защиты машин и механизмов нефтегазотрубопроводных систем нефтьегазовой отрасли практически не достаточно учтены их адгезионные, коррозионностойкие и другие важнейшие физико-механические свойства, определяющие их работоспособность и долговечность в агрессивных условиях их эксплуатации. Необходимо отметить, что разработка эффективных составов коррозионностойких композиционных ингибиторных материалов и покрытий на их основе с высокими антикоррозионными и важнейшими физико-механическими свойствами и технология их получения ещё далеки от своего завершения. В данной работе рассматривается решение этих проблем.

Целью исследования является разработка эффективных составов и исследование физико-химических свойств разработанных коррозионностойких композиционных ингибиторных материалов на основе местного сырья и отходов производств для защиты от коррозии машин и механизмов, применяемых в процессе испытаний и оценка эффективности нефтегазовых скважин в нефтегазовой отрасли промышленности.

Объект и методика исследования. Объектом исследования были выбраны госсиполовая смола- являющаяся отходом масложирового производства, жидкий аммиак, аминоспирты - моноэтаноламин ($H_2NCH_2CH_2OH$), диэтаноламин ($HN(CH_2CH_2OH)_2$), триэтаноламин ($N(CH_2CH_2OH))_3$, сиккативы – окиси металлов, пластификаторы и напольнители.

Материалы и методы

В диссертации использованы современные физико-химические методы, ИК-спектроскопии (ИК), рентгенофазового (РФА), энергодисперсионного сканирующего электронного микроскопа (SEM-EDX) и ЭПР-анализ.

Результаты исследования и их обсуждение

Для разработки антикоррозионных композиционных ингибирующих материалов были изучены как компоненты композиции: амины, четвертичные аммониевые соли, амины и диамины ацетиленового ряда, ацетиленовые аминоспирты и их производные (моноэтаноламин (H_2NCH_2CHOH), диэтаноламин ($HN(CH_2CH_2OH)_3$), триэтаноламин ($N(CH_2CH_2OH))_3$, β(N,N-диэтиленаминоэтаноламин) $(C_2H)_2NCH_2CH_2OH)$), аминокарбанильные производные и отходы АО «Навои-Азот» образующиеся при производстве ацетальдегида гидратацией ацетилена - кротоновая фракция в качестве побочного продукта.

Исследованием установлено, что состав кротоновой фракции состоит из 57,4 – 66,95 % кротоновой альдегида, 13,45 – 24,47 % паральдегида, 0,63 – 2,26 % ацетальдегида, 7,79 – 10,56 % ацетона и 1,43 – 5,26 % воды.

Анализ этих соединений, используемых для производства ингибиторов коррозии показал, что наиболее высокой адсорбционной способностью на поверхности металла обладают углеводороды, имеющие двойные и тройные связи. Железо катализирует процесс

полимеризации олефиновых и ацетиленовых углеводородов, способствуя образованию полимерной пленки, препятствующей доступу агрессивных сред к поверхности металла [1, 2, 6, 7, 8, 9, 10].

Из-за отсутствия производства ингибиторов коррозии в Республике последние импортируются, из других стран затрачивая на это значительные средства. В настоящее время нефтегазодобывающая промышленность Республики использует ингибиторы коррозии Додикор 4543, 4712 (Германия, 3180 и 2090 доллар за тонну), Виктор нефтехим. В-2, В-3 (Россия) за 1 тн. 2693,7 доллар США, а также привозимые из-за рубежа антикоррозионные покрытия, как CORTEC VPCI-337 (Россия) за 1 тн. 20526,0 доллар США, «Кватрамин 1001» (Россия) за 1 тн. 11095,2 доллар США и SikaCor Zinc R (Friazinc R) 16317,2 доллар США [11, 12, 13, 14, 15].

Таким образом, для создания эффективного ингибитора необходимо сырье, в котором присутствуют двойные, тройные, альдегидные и альдеминовые функциональные группы, либо их смесь. В качестве основы таких систем предлагается использовать для этой цели отходы масложиркомбината содержащих эти соединения – госсиполовая смола (гудрон) и аминоспирты – моноэтаноламины и диэтаноламины.

Для получения композиционных химических ингибиторов коррозии были использованы неорганические и высокомолекулярные органические соединения, были исследованы их физико-химические характеристики.

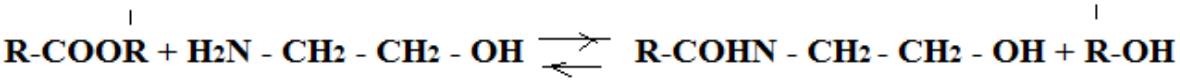
Результаты исследования показали, что минерализованная пластовая вода в процессе добычи углеводородов в газоконденсатных месторождениях адсорбируются на поверхности металлических рабочих органов машин и механизмов, труб и способствуют проявлению коррозии. Для предотвращения образования солевых отложений на поверхности оборудования необходимо применять композиционные ингибирующие пленкообразующие материалы, позволяющие образовать защитные слои на поверхности металлических рабочих органов испытательных машин и механизмов при добавлении ингибиторов солеотложения [4, 8, 11, 15, 16, 17].

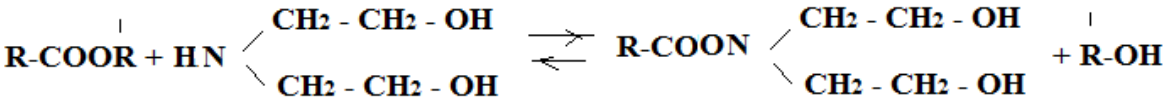
Для защиты металлических труб в лаборатории «Механохимическая технология композитов и химических реагентов» ГУ «Фан ва тараккиёт» разработан новый состав композиционного ингибирующего материала, защищающего от коррозии агрессивных сред, путем образования на поверхности металла гидрофобную защитную пленку, состоящую из госсиполовой смолы и аминоспиртов [1, 8, 12].

Для разработки композиционных ингибиторов, позволяющих защищать металлы в средах пластовых вод нами в первую очередь, были исследованы характеристики отдельных фракций госсиполовой смолы, физико-химические свойства аминоспиртов и химический состав пластовых минерализованных вод м/р КашПИ.

Исследованием установлено, что госсиполовая смола, в основном, состоит 21 – 24 мас.ч. из неомыляющей части, состоящей из углеводорода C_{27}, C_{28}, C_{29}, C_{30}, C_{31}, C_{32}; 52 – 57 мас.ч. из жирно-кослотной части, состоящей из спирта и цитостерина и жирные кислоты C_{15}, C_{12}; 22 – 24 мас.ч. из фенольной части, состоящей из фенолов. А аминоспирты, состоящие из моноэтаноламина, диэтаноламина и триэтаноламина их удельный вес и температура кипения находится в пределах от 1,017 до 101242 г/см^3 и 170,5-360^{0}С соответственно.

Следовательно, в состав госсиполовой смолы входит примерно 20 % жирных кислот, значительную часть которых составляют ненасыщенные высокомолекулярные кислоты, а используемые для получения ингибиторов коррозии аминоспирты являются бифункциональными, при их взаимодействии с высшими карбоновыми кислотами эфиров в составе госсиполовой смолы с моноэтаноламином протекает по схеме:





Таким образом можно отметить, что взаимодействие аминов с жирными кислотами, содержащимися в госсиполовой смоле, могут давать диапозон различных веществ, как за счет взаимодействия с основным продуктом, так и между собой. Поэтому вещества данной группы исследовались как ингибитор коррозии.

Учитывая результаты изучения и анализа современных литературных источников и результатов исследований физико-химических свойств госсиполовой смолы и аминоспиртов были разработаны ряд композиционных химических ингибиторов различных соотношений из аминоспирта - моноэтаноламина и госсиполовой смолы: 1:2, 1:4, 1:6, 1:8 и 1:10 и их концентрации с водой, газоконденсатной, сероводородной и углекислой среде, составы которых приведены на таблице 1 соответственно.

Таблица 1. Состав разработанных композиционных химических ингибиторов

Компоненты для получения ингибиторов коррозии	**АИП-ГС-1**	**АИП-ГС-2**	**АИП-ГС-3**	**АИП-ГС-4**	**АИП-ГС-5**
	Содержание компонентов, масс.ч.				
Госсиполовая смола	20	40	60	80	100
Аминоспирт-моноэтаноламин	10	10	10	10	10

Для получения композиционных химических ингибиторов сначала нагревали госсиполовую смолу при температуре 90 – 100 ^{0}C и амидировали водным раствором аммиака, добавляли расчетное количество моноэтаноламина. Хорошо перемешивали 30 – 40 минут. Получилась однородная масса, и ее разбавляли газоконденсатом до нужной вязкости и перемешивали 20 – 30 минут. Данная методика получения композиционных ингибирующих материалов подробно приведена в главе 2. Защитное действие ингибиторов коррозии (Z, %) определяли по потере массы контрольных образцов в отсутствии и в присутствии ингибиторов коррозии и рассчитывали по формуле:

$$Z = 100 \cdot \frac{K - K_и}{K},$$

Защитный эффект (γ) определяется как отношение:

$$\gamma = \frac{K}{K^{и}}.$$

где К – скорость коррозии образцов в отсутствии ингибитора, г/м^2·ч;

$К_и$ - скорость коррозии образцов в присутствии ингибитора, г/м^2·ч.

На таблице 2 приведены результаты физико-химических и защитных свойств, разработанных композиционных химических ингибиторов.

Таблица 2. Физико-химические и защитные свойства в воде разработанных композиционных химических ингибиторов в зависимости от их вида АИП-ГС

№	Марки ингибитора	Соотношение госсиполовой смолы и моноэтаноламина	Физико-химические свойства разработанных композиционных химических ингибиторов на основе местного и вторичного сырья					
			Концентрация ингибитора в воде, г/л	Плотность	Вязкость	Продолжительность эксперимента, час	Скорость коррозии, г/м^2.ч	Степень защиты, %
1.	АИП-ГС-1	2:1	0,25	1,018	950-1100	24	0,27	82,0
2.	АИП-ГС-2	4:1	0,25	1,019	1400-1600	24	0,25	84,0
3.	АИП-ГС-3	6:1	0,25	1,020	1900-2100	24	0,22	86,0
4.	АИП-ГС-4	8:1	0,25	1,021	2400-2600	24	0,20	88,0
5.	АИП-ГС-5	10:1	0,25	1,022	2800-3000	24	0,18	90,0

Показано, что разработанные антикоррозионные композиционные ингибиторы до 90 % защищает металлические нефтегазовые трубопроводы и конструкции от коррозии и увеличивает долговечность повышая производительность и работоспособность металлических конструкций и оборудований нефтегазовых скважин республики Узбекистан.

Заключение

Таким образом, разработан состав и исследованы физико-химические и защитные свойства разработанных композиционных химических ингибиторов для защиты рабочих органов машин и механизмов применяемых в процессе испытаний и оценки эффективности нефтегазовых скважин новых составов композиционных химических ингибирующих материалов, которые на поверхности металла образуют гидрофобную защитную пленку – покрытия, представляющий собой композиционный химический реагент ингибитор на основе местного сырья и отходов продукции масложиркомбината в виде госсиполовой смолы, амидированной аминоспиртом. Полученная таким образом полимеризованная композиционная амино-госсиполовая смола является антикоррозионным ингибирующим материалом, который положительно влияет на работоспособность и эксплуатационные свойства, а также долговечность металлических конструкций и оборудований нефтегазовых скважин республики Узбекистан.

Список литературы

1. Абед Н.С., Икрамова М.Э., Бабаханова М.А., Номозов С.С. Исследование влияния органоминеральных ингредиентов на физико-химические, механические и эксплуатационные свойства композиционных лакокрасочных материалов, применяемых в различных отраслях промышленности // Композиционные материалы. – 2025. – № 3. – С. 204–205.
2. Ануфриев Н.Г. Ускоренный метод оценки коррозивности кислотныхрастворов по отношению к низкоуглеродистой стали / Н.Г. Ануфриев, М. Атеф Эль-Сайед // Коррозия: материалы, защита. – 2010. – № 1. – С. 44–48.
3. Басарыгин Ю.М. Отложения минеральных солей в скважинах, способы их предупреждения и удаления. «Технология капитального и подземного ремонта нефтяную и газовых скважин», Учеб, для вузов, Краснодар: «Сов. Кубань». – 2002. – 584 с.
4. Бебих Г.Ф. Некоторые аспекты действия ингибиторов коррозии металлов в многофазных системах / Г.Ф. Бебих, В.М. Сенько // Коррозия: материалы, защита. – 2006. – № 3. – С. 29–35.
5. В.К. Половняк, И.В. Тимофеева, О.Н. Быстрова, С.В. Половняк, Р.Д. Айманов. Защитное действие азот, фосфорсодержащих ингибиторов сероводородной коррозии стали и их промышленные испытания в условиях нефтедобычи и нефтепереработки // Практика противокоррозионной защиты. – 2006. – № 3. – С. 44–48.
6. Вигдорович В.И., Завершинский А.Н. Вигдорович В.И., Завершинский А.Н // Защита металлов. – 2003. – Т. 39, № 1. – С. 100–104.
7. Вигдорович В.И. Эффективность ингибиторов серии «АМДОР» в условиях углекислотной коррозии углеродистой стали / В.И. Вигдорович, С.А. Закурнаев // Практика противокоррозионной защиты. – 2008. – № 4 (50). – С. 40–44.
8. Кенжаев Н.А., Негматов С.С., Эсанмуродов Ш.В., Негматова К.С., Номозов С.С., Икрамова М.Э. Исследование физико-химических свойств ионов минерализованных пластовых вод Кашкадаринского месторождения скважин // Композиционные материалы.-Ташкент. – 2025. – № 1. – С. 210–211.
9. Кузнецов Ю.И. Защита стали летучими ингибиторами от углекислотной коррозии. I. Жидкая фаза / Ю.И. Кузнецов, Н.Н. Андреев, К.А. Ибатуллин, С.В. Олейник // Защита металлов. – 2002. – Т. 38, № 4. – С. 368–374.
10. Моисеева Л.С. Углекислотная коррозия нефтепромыслового оборудования / Л.С. Моисеева // Защита металлов. – 2005. – Т. 41, № 1. – С. 82–90.
11. Моисеева Л.С. Защита стали в водных нефтепромысловых средах комбинированными ингибиторами коррозии / Л.С. Моисеева, О.И. Пущина // Коррозия: материалы, защита. – 2004. – № 8. – С. 6–10.

12. Негматов С.С., Бабаханова М.А., Салимова С.Ш., Рахимов Х.Ю., Косимов Ш.Б., Намозов С.С., Саидкулов С.А. Выбор объектов исследований и изучение физико-химических свойств органоминеральных ингредиентов на основе местного сырья и отходов производств для получения композиционных полимерных лакокрасочных материалов // Композиционные материалы. – 2025. – № 4. – С. 198–199.
13. Пантелеева А.Р. Защитные свойства нового водорастворимого ингибитора коррозии – бактерицида НАПОР-1010 / А.Р. Пантелеева, Р.Д. Айманов // Нефтегаз INTERNATIONAL. – 2008. – С. 62–63.
14. Пантелеева А.Р. О механизме защиты от коррозии нефтепромыслового оборудования ингибиторами коррозии, разработанными ОАО «НАПОР» / Л.Р. Пантелеева, Р. ДАйманов, В.К. Половняк, С.В. Половняк // Сборник статей IV Всероссийской научно-практической конференции. «Защитные и специальные покрытия, обработка поверхности в машиностроении и приборостроении». г. Пенза. – 2007. – С. 67–69.
15. Половняк В.К. Исследование системы «ингибитор – металл» при сероводородной коррозии стали / В.К. Половняк, Р.Д. Айманов, О.Н. Быстрова, С.В. Половняк // Практика противокоррозионной защиты. – 2007. – № 4. – С. 13–16.
16. Цыганкова Т.Е., Шитикова Е.А., Зверева А.А. Цыганкова Т.Е. Влияние композиции АМДОР ИК-3Н на коррозию стали в сероводородно-углекислотных средах / Л.Е. Цыганкова, Е.А. Шитикова, А.А. Зверева // Коррозия: материалы, защита. – 2010. – № 12. – С. 12–17.
17. Tsygankova L.E. Inhibition of carbon steel corrosion in media with H2S studied by impedance spectroscopy method / L.E. Tsygankova, V.l. Vigdorovich, E.G. Kuznetsova, V.l. Kichigin // Surface and Interface Analysis. – 2008. – Т. 40, № 34. – P. 303–306.

References

1. Abed N.S., Ikramova M.E., Babakhanova M.A., Nomozov S.S. [Investigation of the Effect of Organomineral Ingredients on the Physicochemical, Mechanical, and Operational Properties of Composite Paint and Varnish Materials Used in Various Industrial Sectors] // Kompozitsionnye materialy. – 2025. – No. 3. (In Russ.).
2. Anufriev N.G. [An Accelerated Method for Assessing the Corrosivity of Acidic Solutions with Respect to Low-Carbon Steel] // Korroziya: materialy, zashchita. – 2010. – No. 1. (In Russ.).
3. Basarygin Yu.M. [Deposits of Mineral Salts in Boreholes, Methods of Their Prevention and Removal. 'Technology of Major and Subsurface Repair of Oil and Gas Wells', Textbook for Universities, Krasnodar: 'Sov. Kuban']. – 584 s. – 2002. (In Russ.).
4. Bebikh G.F., Sen'ko V.M. [Some Aspects of the Action of Metal Corrosion Inhibitors in Multiphase Systems] // Korroziya: materialy, zashchita. – 2006. – No. 3. (In Russ.).
5. V.K. Polovnyak, I.V. [Timofeeva, O.N. Bystrova, S.V. Polovnyak, R.D. Aimanov. Protective Effect of Nitrogen- and Phosphorus-Containing Inhibitors of Hydrogen Sulfide Corrosion of Steel and Their Industrial Testing Under Oil Production and Oil Refining Conditions] // Praktika protivokorrozionnoj zashchity. – 2006. – No. 3. (In Russ.).

6. Vigdorovich V.I., Zavershinskij A.N. [Vigdorovich V.I., Zavershinskiy A.N.] // Zashchita metallov. – 2003. – Vol. 39, No. 1. (In Russ.).
7. Vigdorovich V.I., Zakurnaev S.A. [Effectiveness of Inhibitors of the 'AMDOR' Series Under Carbon Dioxide Corrosion Conditions of Carbon Steel] // Praktika protivokorrozionnoj zashchity. – 2008. – No. 4 (50). (In Russ.).
8. Kenzhaev N.A., Negmatov S.S., Esanmurodov Sh.V., Negmatova K.S., Nomozov S.S., Ikramova M.E. [Investigation of the Physicochemical Properties of Ions in Mineralized Formation Waters of the Kashkadarya Field Boreholes] // Kompozitsionnye materialy.-Tashkent. – 2025. – No. 1. (In Russ.).
9. Kuznetsov Yu.I., Andreev H.H., Ibatullin K.A., Olejnik C.B. [Protection of Steel from Carbon Dioxide Corrosion by Volatile Inhibitors. I. Liquid Phase] // Zashchita metallov. – 2002. – Vol. 38, No. 4. (In Russ.).
10. Moiseeva L.S. [Carbon Dioxide Corrosion of Oilfield Equipment] // Zashchita metallov. – 2005. – Vol. 41, No. 1. (In Russ.).
11. Moiseeva L.S., Pushchina O.I. [Protection of Steel in Aqueous Oilfield Environments Using Combined Corrosion Inhibitors] // Korroziya: materialy, zashchita. – 2004. – No. 8. (In Russ.).
12. Negmatov S.S., Babakhanova M.A., Salimova S.Sh., Rakhimov Kh.Yu., Kosimov Sh.B., Namozov S.S., Saidkulov S.A. [Selection of Research Objects and Study of the Physicochemical Properties of Organomineral Ingredients Based on Local Raw Materials and Industrial Waste for Obtaining Composite Polymer Paint and Varnish Materials] // Kompozitsionnye materialy. – 2025. – No. 4. (In Russ.).
13. Panteleeva A.R. [Protective Properties of a New Water-Soluble Corrosion Inhibitor-Bactericide NAPOR-1010] / A.R.Panteleeva, R.D.Ajmanov // Neftegaz INTERNATIONAL. – 2008. (In Russ.).
14. Panteleeva A.R. [On the Mechanism of Protection of Oilfield Equipment from Corrosion by Corrosion Inhibitors Developed by PAO 'NAPOR'] / L.R.Panteleeva, R. DAjmanov, V.K. Polovnyak, S.V. Polovnyak // Sbornik statej IV Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferentsii. «Zashchitnye i spetsial'nye pokrytiya, obrabotka poverkhnosti v mashinostroenii i priborostroenii». g. Penza. – 2007. (In Russ.).
15. Polovnyak V.K. [Investigation of the 'Inhibitor-Metal' System During Hydrogen Sulfide Corrosion of Steel] / V.K. Polovnyak, R.D. Ajmanov, O.N. Bystrova, S.V. Polovnyak // Praktika protivokorrozionnoj zashchity. – 2007. – No. 4. (In Russ.).
16. Tsygankova L.E., Shitikova E.A., Zvereva A.A. [Tsygankova T.E. The Effect of AMDOR IK-3N Composition on Steel Corrosion in Hydrogen Sulfide-Carbon Dioxide Environments] // Korroziya: materialy, zashchita. – 2010. – No. 12. (In Russ.).
17. Tsygankova L.E. Inhibition of carbon steel corrosion in media with H2S studied by impedance spectroscopy method / L.E. Tsygankova, V.l. Vigdorovich, E.G. Kuznetsova, V.l. Kichigin // Surface and Interface Analysis. – 2008. – Vol. 40, No. 34. – P. 303–306.

Статья поступила в редакцию: 14.10.2026
Статья принята к публикации: 20.10.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 537.2+678.5+677.21

Исследование процесса электризации при фрикционном взаимодействии полимерных, композиционных полимерных материалов и покрытий с хлопком-сырцом в зависимости от вида и природы полимеров и наполнителей

Нормуродов Анвар Азамат Ўғли
соискатель
Государственного учреждения "Фан ва тараккиёт"
Ташкентский государственный технический университет,
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: bozorboyev1983@mail.ru
Бозорбоев Шухрат Абдурахимович
д-р филос. по техн. наук, (PhD),
ст. научн. сотр.,
ГУП "Фан ва тараккиёт",
Ташкентский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Рахимкулова Тулкиной Мухтаровна
докторант (PhD)
Государственного учреждения "Фан ва тараккиёт",
Ташкентский государственный технический университет,
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Эргашев Нурбек Эркинович
соискатель
Государственного учреждения "Фан ва тараккиёт",
Ташкентского государственного технического университета,
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Холматова Элдора Абдуназаровича
соискатель
Государственного учреждения "Фан ва тараккиёт" Ташкенсткий государственный технический университет,
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Study of the electrification process during frictional interaction between polymeric materials, polymer-based composite materials and coatings with raw cotton, depending on the type and nature of polymers and fillers

Normurodov Anvar Azamat ugli
Research Applicant,
State Institution "Fan va Taraqqiyot,"
Tashkent State Technical University, Tashkent, Republic of Uzbekistan

Библиографическое описание: Исследование процесса электризации при фрикционном взаимодействии полимерных, композиционных полимерных материалов и покрытий с хлопком-сырцом в зависимости от вида и природы полимеров и наполнителей // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Нормуродов А.А.Ў. [и др.]. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23600

Bozorboev Shukhrat Abdurakhimovich
Doctor of Philosophy (PhD) in Technical Sciences,
Senior Researcher
State Unitary Enterprise "Fan va Taraqqiyot,"
Tashkent State Technical University, Tashkent, Republic of Uzbekistan
Rakhimkulova Tulkynoy Mukhtarovna
PhD Doctoral Student
State Institution "Fan va Taraqqiyot,"
Tashkent State Technical University, Tashkent, Republic of Uzbekistan
Ergashev Nurbek Erkinovich
Applicant
at the State Institution "Fan va Tarakkiyot"
Tashkent State Technical University,
Republic of Uzbekistan, Tashkent
Kholmatov Eldor Abdunazarovich
Applicant
State Institution "Fan va Tarakkiyot"
Tashkent State Technical University,
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

В статье представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований процессов электризации полимерных и композиционных полимерных материалов и покрытий при фрикционном взаимодействии с хлопком-сырцом в зависимости от вида и природы полимеров и наполнителей. Исследованы закономерности образования и утечки электростатических зарядов на поверхности покрытий на основе термореактивных полимеров ЭД-16, ФАЭД-20 и ФАЭИС-30, а также влияние степени сшивки макромолекул, содержания отвердителя и пластификатора на интенсивность электризации. Установлено, что характер электризации определяется природой полимерного связующего, электрофизическими свойствами наполнителей и их концентрацией в составе композиции. Показано, что введение электропроводящих наполнителей, таких как технический углерод, графит, железный порошок, алюминиевая и бронзовая пудра, способствует снижению поверхностной плотности электростатического заряда за счёт повышения электропроводности композиционных материалов и облегчения отвода зарядов. Выявлены особенности влияния минеральных, металлических и углеродсодержащих наполнителей на электрофизические и триботехнические свойства полимерных покрытий. Установленные закономерности могут быть использованы при разработке антифрикционных композиционных полимерных материалов с регулируемыми электростатическими свойствами для рабочих органов хлопкоперерабатывающих машин и механизмов. Практическая значимость работы заключается в возможности снижения накопления статического электричества, повышения износостойкости и долговечности покрытий, а также уменьшения пожароопасности технологических процессов переработки хлопка-сырца.

Abstract

This article presents the results of theoretical and experimental investigations into the electrification processes occurring during the frictional interaction of polymeric materials, polymer composites, and coatings with raw cotton, depending on the type and nature of the polymers and

fillers. The mechanisms governing the generation and dissipation of electrostatic charges on the surfaces of coatings based on thermosetting polymers ED-16, FAED-20, and FAEIS-30 are investigated, along with the effects of macromolecular crosslinking, hardener content, and plasticizer content on the intensity of electrification. It is established that the electrification behavior is determined by the nature of the polymer binder, the electrophysical properties of the fillers, and their concentration in the composite. The results demonstrate that the incorporation of electrically conductive fillers, such as carbon black, graphite, iron powder, aluminum powder, and bronze powder, helps reduce the surface charge density by increasing the electrical conductivity of composite materials and facilitating charge dissipation. The effects of mineral, metallic, and carbon-based fillers on the electrophysical and tribological properties of polymer coatings are identified. The established relationships can be used in the development of antifriction polymer composites with controllable electrostatic properties for the working components of cotton-processing machines and mechanisms. The practical significance of this study lies in its potential to reduce static electricity accumulation, improve the wear resistance and service life of coatings, and mitigate fire hazards during raw cotton processing.

Ключевые слова: электризация, трибоэлектрический эффект, фрикционное взаимодействие, хлопок-сырец, электростатический заряд, электропроводящие наполнители, электрофизические свойства.

Keywords: electrification, triboelectric effect, frictional interaction, raw cotton, electrostatic charge, electrically conductive fillers, electrophysical properties.

Введение

Анализ проведенных теоретических и экспериментальных исследований показал, что процессы взаимодействия композиционных полимерных материалов и покрытий из них с хлопком-сырцом имеет сложную природу. При этом специфика контактирующих тел (полимер-хлопок-сырец) обуславливается процессами электризации воздействующих на поверхностные слои полимерных покрытий и тем самым влияющих на их электрофизические и физико-механические свойства. Кроме того, показано, что уменьшение электризации полимерных покрытий способствует улучшению их антифрикционных свойств. Эти результаты позволяют направленно изменять и регулировать антифрикционные свойства полимерных покрытий, работающих при взаимодействии с хлопком-сырцом.

Так, возникновение электростатического заряда в контактной зоне полимер-хлопок отрицательно влияет на коэффициент трения, износостойкости и долговечности полимерных покрытий, а также усиливают пожароопастность в процессе переработки хлопка-сырца.

Устранение этих явлений, возможно, будет путем глубокого изучения и целенаправленного регулирования электрофизических и прочностных свойств материала и созданием эффективных составов антифрикционных композиционных материалов, обеспечивающие устранение возникновения и накапливания электростатического заряда в контектной зоне и низкие коэффициент трения, изнашивания и увеличения долговечности покрытий на их основе применяемых в деталях рабочих органов хлопкоперерабатывающих машин.

Как было выше отмечено, возникновение электростатического заряда в контактной зоне полимер-хлопок отрицательно влияет на коэффициент трения, износостойкость и долговечность полимерных покрытий. В этом плане с целью выбора наиболее активных полимерных материалов для использования в качестве покрытий, ранее нами был проведен анализ условий работы машин и механизмов хлопкозаводов, так как в конечном итоге эффективность применения полимерных покрытий зависит от конструкции и назначения машин, материала, условий эксплуатации и т.п. Как отмечено в работах [8; с.134-142; 6; с. 16-17; 1; с.17-19; 7; с.32] машины и механизмы, применяемые для переработки хлопка-сырца, имеют конструктивные, технологические и целый ряд специфических недостатков, влияющих на природные свойства хлопка-сырца, и которые сводятся к следующему:

- повреждению хлопковых волокон и семян, возникновению шума и пожароопасности;
- высокий коэффициент трения;
- острые кромки заусенцев, шероховатость и субмикронеровности;
- повышенное пожараопастность, возникающих при ударение рабочих органов машин с твердыми включениями, находящимися в хлопке-сырце.

Как было сказано ранее, применение полимерных покрытий в рабочих органах машин и механизмов способствовало устранению или сведению до минимума целого ряда указанных недостатков. При этом покрытия будут работать в условиях статических и динамических нагрузок, а также вибрации, под воздействием климатических факторов и агрессивных сред.

В соответствие с вышеизложенным выбор полимерных материалов в качестве основы антифрикционных полимерных композиций осуществлялся последующим критериям:

- технологичность и экономичность используемого полимерного материала, методики и аппаратуры для нанесения покрытий на поверхности рабочих органов машин;
- комплекс необходимых для условий эксплуатации электрофизических и физико-механических свойств, сохраняющих стабильность при температурах от -20 до +80°С и влажности окружающей среды до 80 %, а также при воздействии климатических факторов и агрессивных сред;
- при работе на трение должны обладать высокими антифрикционными свойствами в диапазоне скоростей до 8м/с (иногда до 25 м/с) и нагрузок от 0,005 до 0,05 МПа и сравнительно низкой электризуемостью.

Были исследованы процессы трибоэлектризации при фрикционном взаимодействии термореактивных эпоксидных полимеров и его производных при трении с хлопком-сырцом.

Наиболее полно удовлетворяют общим и специальным требованиям и условиям эксплуатации при трении с хлопком-сырцом такие полимеры как ЭД-16, ФАЭД-20 и ФАЭИС-30 которые и были выбраны в качестве основы для создания антифрикционных полимерных материалов функционального назначения. Эти полимерные материалы обладают наилучшими антифрикционными свойствами, высокой теплостойкостью, технологичностью получения покрытий.

В качестве полимерной матрицы исследованы термореактивные связующие: эпоксидно-диановая смола **ЭД-16**, фурано-эпоксидный олигомер ФАЭД-20 и фурано-эпоксид-сланцевый олигомер ФАЭИС-30. В качестве отвердителя использовался полиэтиленполиамин (ПЭПА)

в количестве: 12 мас.ч. на 100 мас.ч. для ЭД-16; 25–30 мас.ч. для ФАЭД-20 и ФАЭИС-30. В качестве пластификатора применялся дибутилфталат (ДБФ) с варьированием концентрации от 5 до 25 мас.ч.

Для регулирования электрофизических и триботехнических свойств вводились наполнители со следующими дисперсными характеристиками (средний размер частиц ($d_ч$):

Минеральные: каолин ($d_ч$= 2 – 5 мкм), тальк ($d_ч$ = 5 – 10 мкм);

Углеродсодержащие: графит серебристый ($d_ч$ = 10 – 15 мкм), технический углерод / сажа ($d_ч$ 30 – 50 нм);

Металлические и оксиды: железный порошок ПЖВ ($d_ч$ = 40 – 60 мкм), алюминиевая пудра ПАП-2 (чешуйчатая, толщина частиц 0,25 – 0,5 мкм), бронзовая мука ($d_ч$ = 15 – 25 мкм), закись меди CuO и оксид железа Fe_2O_3 ($d_ч$ = 1 – 3 мкм).

Режимы смешения, нанесения и отверждения покрытий

Смешение компонентов осуществлялось в лопастном микросмесителе со скоростью вращения ротора 600 об/мин при температуре 40–50 °C в течение 15–20 минут для достижения однородного распределения дисперсной фазы и снижения вязкости композиции. Отвердитель ПЭПА вводился непосредственно перед нанесением.

В качестве подложки использовались пластины и рабочие элементы из конструкционной стали марки Ст3. Подготовка поверхности подложки включала механическую очистку (пескоструйная обработка до шероховатости Ra = 2,5 – 3,2 мкм), обезжиривание органическими растворителями (ацетон, толуол) и последующую сушку. Композиции наносились методом пневматического распыления и поливом. Толщина сформированных покрытий составляла строго 250±20 мкм, контроль толщины выполнялся магнитным толщиномером.

Режим ступенчатого отверждения покрытий: выдержка при комнатной температуре (20±2 °C) — 24 часа, последующая термообработка при температуре 80 °C в течение 4 часов и окончательная стабилизация при 120 °C в течение 2 часов для достижения максимальной степени сшивки макромолекул.

Характеристики контртела (хлопка-сырца) и условия кондиционирования

Во фрикционном контакте использовался хлопок-сырец селекционного сорта С-6524 (промышленный сорт 1, ручной сбор). Перед проведением испытаний волокнистая масса подвергалась принудительной сушке и последующему кондиционированию по ГОСТ 6433.1 – 71 в эксикаторах над насыщенными растворами солей для фиксации стандартной влажности хлопка-сырца на уровне 8,0±0,5 %.

Параметры испытательной среды и трибометрии

Триботехнические испытания и замеры электризации выполнялись на дисковом трибометре (конфигурация «диск — волокнистая масса») в соответствии с O‘z DSt 3330:2018. Параметры испытательной среды в лабораторной камере поддерживались стационарными: температура воздуха 20±2 °C, относительная влажность 65±5 %. Режимы трения: скорость скольжения V = 6 м/с, удельное давление P = 0,05 МПа.

Измерения электрических параметров изоляции и поверхностного сопротивления проводились на постоянном напряжении по ГОСТ 6433.2 – 71 с использованием тераомметра Е6-13 и электрометра В7-30.

Определение величины заряда статического электричества

Образующиеся заряды в зоне трения снимали при помощи электродов. Величины зарядов статического электричества определяли, измеряя величину потенциала при помощи вольтметра С-50 по методике, описанной в работе [13; с.15]. Для предотвращения утечки зарядов, образовавшихся в результате трения, отдельные детали и узлы трибометра изолировали фторопластовыми прокладками. Образующиеся заряды в зоне трения снимали при помощи электродов. Величины зарядов статического электричества и их плотности определяли, измеряя величину потенциала при помощи вольтметра С-50.

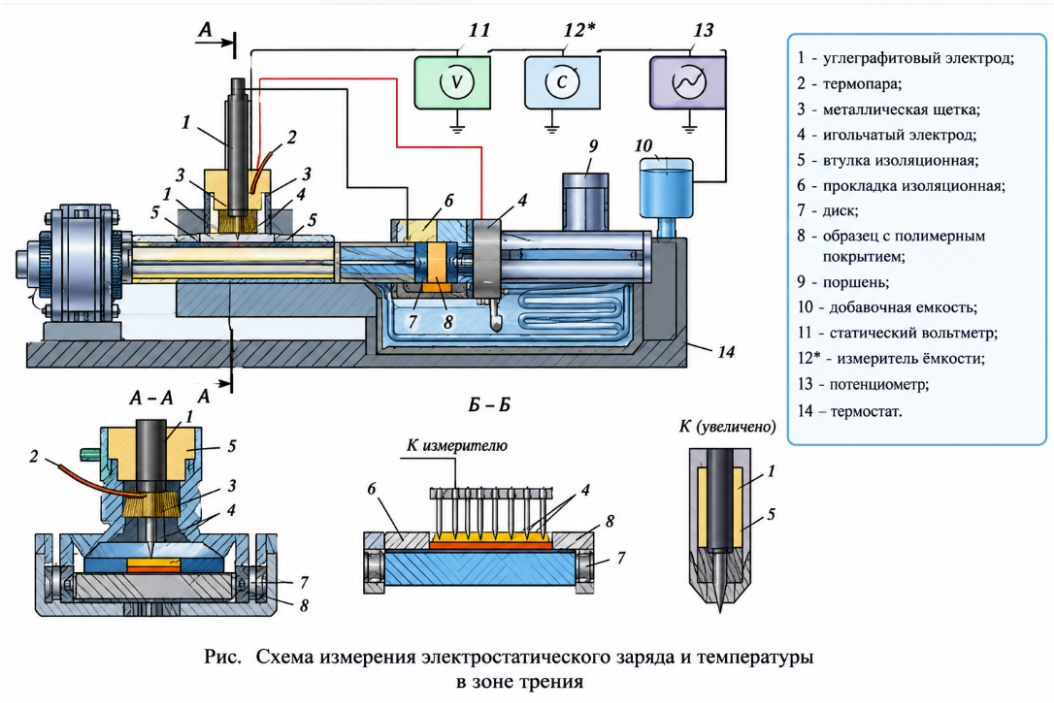


Рис. Схема измерения электростатического заряда и температуры в зоне трения

Рисунок 1. Схема измерения электрического заряда и температуры в зоне трения

В первом варианте (рис. 1) съём зарядов производился с помощью металлической щетки, на концах которой крепили гибкие проволочки. При таком измерении зарядов появляется дополнительная погрешность из-за электризации самой щетки.

Нами применен датчик, устанавливаемый на определенном расстоянии от заряженной поверхности полимерного покрытия, но позволяющий более просто получать надежные данные. Датчик представляет собой металлическую пластинку с игольчатыми электродами,

погруженными в хлопок. Величина заряда измеряется статическим вольтметром, которая передается с заряженной поверхности на датчик по электростатической индукции. При этом опыты показали, что точность измерений величин зарядов при контактном и бесконтактном съеме зарядов практически одинакова. Датчик изолируется от корпуса установки фторопластовыми прокладками. Изоляция зоны трения с использованием высоких диэлектрических свойств фторопласта повышает точность измерения электростатических зарядов. Этому способствует также добавочная ёмкость в измерительной цепи.

Образующиеся заряды в зоне трения снимали при помощи электродов. Величины зарядов статического электричества определяли, измеряя величину потенциала при помощи вольтметра С-50 по методике, описанной в работе [13; с.15]. Для предотвращения утечки зарядов, образовавшихся в результате трения, отдельные детали и узлы трибометра изолировали фторопластовыми прокладками. Образующиеся заряды в зоне трения снимали при помощи электродов. Величины зарядов статического электричества и их плотности определяли, измеряя величину потенциала при помощи вольтметра С-50.

В первом варианте (рис. 1) съём зарядов производился с помощью металлической щетки, на концах которой крепили гибкие проволочки. При таком измерении зарядов появляется дополнительная погрешность из-за электризации самой щетки.

Нами применен датчик, устанавливаемый на определенном расстоянии от заряженной поверхности полимерного покрытия, но позволяющий более просто получать надежные данные. Датчик представляет собой металлическую пластинку с игольчатыми электродами, погруженными в хлопок. Величина заряда измеряется статическим вольтметром, которая передается с заряженной поверхности на датчик по электростатической индукции. При этом опыты показали, что точность измерений величин зарядов при контактном и бесконтактном съеме зарядов практически одинакова. Датчик изолируется от корпуса установки фторопластовыми прокладками. Изоляция зоны трения с использованием высоких диэлектрических свойств фторопласта повышает точность измерения электростатических зарядов. Этому способствует также добавочная ёмкость в измерительной цепи.

По известной ёмкости системы и потенциалу, измеренному статическим вольтметром, величину заряда определяли по формуле

$$Q = U(C_{ВК} + C_{с} + C_{дк}), \quad (1)$$

где $C_{вк}$ - ёмкость статического вольтметра;

$C_{с}$ - ёмкость трущейся пары;

$C_{дк}$ - ёмкость добавочного конденсатора;

U - напряжение, измеренное статическим вольтметром.

Максимальный заряд статического электричества достигается при разном времени трения с хлопком-сырцом. В результате исследования кинетика образования зарядов статического электричества установлено, что время образования максимального заряда для всех полимерных материалов колеблется от 20 до 145 с. Поэтому во всех экспериментах величину зарядов статического электричества измеряли через 180 с после начала опыта.

Принцип измерения и условия заземления

Максимальный заряд статического электричества достигается при разном времени трения с хлопком-сырцом. В результате исследования кинетика образования зарядов статического электричества установлено, что время образования максимального заряда для всех полимерных материалов колеблется от 20 до 145 с. Поэтому во всех экспериментах величину зарядов статического электричества измеряли через 180 с после начала опыта.

Определение поверхностной плотности электростатического заряда ($q_з$) осуществлялось бесконтактным методом электростатической индукции. Конструкция установки включала подвижный приводной диск с испытуемым покрытием, прижимное устройство с кассетой для хлопка-сырца и плоский металлический датчик-зонд (электрод-приемник), подключенный к электрометру.

Для исключения внешних наводок все металлические узлы трибометра и экранирующие оплетки кабелей были стационарно заземлены на общий лабораторный контур. Перед каждым циклом трения остаточный заряд полностью снимался заземленной медной пластиной. Временной регламент эксперимента строго контролировался: время между прекращением трения (остановом диска) и началом замера плотности остаточного заряда составляло строго 2±0,5 секунды.

Для качественной оценки процессов электризации полимерных покрытий были выполнены исследования кинетики электризации, которые показали, что наиболее быстро и больше электризуются полярные фурано-эпоксид-сланцевые и фурано-эпоксидные олигомеры (табл.1).

Таблица 1. Зависимость скорости образования и утечки поверхностной плотности заряда полимерных покрытий при их различном времени взаимодействие с хлопком-сырцом со скоростью скольжения V = 6м/с и удельным давлением P = 0,05 Мпа

$\tau_{кв}$ композиционных полимеров с хлопком-сырцом	**Вид полимерного материала**								
	ЭД-16			**ФАЭД-20**			**ФАЭИС-30**		
	$V_{об.з}$, кс	**$q_з$, $q\cdot10^6$ Кл/м^2**	**$V_{ут\cdot з}$, $q\cdot10^6$ Кл/м^2**	**$V_{об.з}$, кс**	**$q_з$, $q\cdot10^6$ Кл/м^2**	**$V_{ут\cdot з}$, $q\cdot10^6$ Кл/м^2**	**$V_{об.з}$, кс**	**$q_з$, $q\cdot10^6$ Кл/м^2**	**$V_{ут\cdot з}$, $q\cdot10^6$ Кл/м^2**
0,04	1,2	35	52	1,2	70	64	1,2	75	69
0,08	2,4	42	45	2,4	75	50	2,4	78	62
0,12	3,6	43	32	3,6	76	42	3,6	79	49
0,16	4,8	43	22	4,8	76	32	4,8	80	46
0,20	6,0	46	18	6,0	78	29	6,0	82	38

Для качественной оценки процессов электризации полимерных покрытий были выполнены исследования кинетики электризации, которые показали, что наиболее быстро и больше электризуются полярные фурано-эпоксид-сланцевые и фурано-эпоксидные олигомеры (табл.1).

Примечание: $\tau_{кв}$-время контактного взаимодействия, τ кс;

$V_{об.з}$-скорость образования заряда, τ кс;

$q_з$-плотность образованного заряда, $q \cdot 10^6$ Кл/м^2

$V_{ут.\ з}$- скорость утечки образующихся заряда, $q \cdot 10^6$ Кл/м^2

Экспериментально доказано, что полярные фурано-эпоксидные (ФАЭД-20) и фурано-эпоксид-сланцевые (ФАЭИС-30) покрытия обладают более высокой начальной скоростью электризации (плотность образованного заряда $q_з$ = 70 – $75 \cdot 10^6$ Кл/м² уже при времени контактного взаимодействия t = 0,04 кс) по сравнению с базовым эпоксидным олигомером ЭД-16 ($q_з$ = $35 \cdot 10^6$ Кл/м²). При этом процессы релаксации (утечки) заряда протекают медленно: даже через длительное время релаксации (6,0 кс) плотность остаточного заряда на покрытиях ФАЭД-20 и ФАЭИС-30 удерживается на высоком уровне (29 – $38 \cdot 10^6$ Кл/м²), что подтверждает необходимость их обязательного модифицирования электропроводящими наполнителями.

При этом, отмечено, что степень электризации полимерных покрытий определяется как скоростью образования, так и скоростью утечки зарядов и зависит от природы полимера.

Установлено, что после прекращения фрикционного взаимодействия полимерных покрытий с хлопком-сырцом, заряды длительное время сохраняются на поверхности покрытий (табл. 1).

При этом, отмечено, что степень электризации полимерных покрытий определяется как скоростью образования, так и скоростью утечки зарядов и зависит от природы полимера.

Установлено, что после прекращения фрикционного взаимодействия полимерных покрытий с хлопком-сырцом, заряды длительное время сохраняются на поверхности покрытий (табл. 1).

Исследования процессов электризации показали, что под действием температуры в зоне трения полимерные покрытия на основе ЭД-16, ФАЭД-20 и ФАЭИС-30 незначительно изменяют электропроводность с увеличением температуры в контактной зоне полимер-хлопок.

Такой характер электропроводности от температуры определяет процессы установления равновесного состояния между образованием и утечкой электростатических зарядов.

Показано, что объяснить зависимость электризации от вида и природы полимерных покрытий только с точки зрения современной теории донорно-акцепторного взаимодействия не представляется возможным, так как в стабильном режиме трения, полимерные покрытия всегда приобретали положительный знак зарядов, а хлопок-сырец – отрицательный знак. При этом выявлена зависимость электризации от степени «сшивки” для термореактивных полимеров.

С увеличением степени сшивки макромолекул термореактивных полимеров при взаимодействии с хлопком-сырцом возрастает образование электризации в контактной зоне трущихся пар.

Возрастание электризации при увеличении содержания отвердителя ПЭПА до 25 – 30 мас.ч. у ФАЭД-20 и ФАЭИС-30 и до 12 мас.ч. у ЭД-16 связано с возрастанием степени структурирования и сшивки макромолекул и, соответственно, уменьшением электропроводности и возрастанием микротвердости. При этом уменьшается утечка зарядов и изменяется характер контактного взаимодействия полимерных покрытий с хлопком-

сырцом. Дальнейшее увеличение содержания ПЭПА приводит к снижению поверхностной плотности электростатических зарядов, что объясняется пластифицирующим воздействием избыточного количества отвердителя на полимерную систему, в результате чего увеличивается гибкость полимерной цепи и, соответственно, электропроводность.

Возрастание электризации при увеличении содержания отвердителя ПЭПА до 25 – 30 мас.ч. у ФАЭД-20 и ФАЭИС-30 и до 12 мас.ч. у ЭД-16 связано с возрастанием степени структурирования и сшивки макромолекул и, соответственно, уменьшением электропроводности и возрастанием микротвердости. При этом уменьшается утечка зарядов и изменяется характер контактного взаимодействия полимерных покрытий с хлопком-сырцом. Дальнейшее увеличение содержания ПЭПА приводит к снижению поверхностной плотности электростатических зарядов, что объясняется пластифицирующим воздействием избыточного количества отвердителя на полимерную систему, в результате чего увеличивается гибкость полимерной цепи и, соответственно, электропроводность.

При увеличении концентрации пластификатора ДБФ в составе ЭД-16, ФАЭД-20 и ФАЭИС-30 электризация вначале уменьшается и при содержании 10 – 15 мас.ч. возрастает. Дальнейшее увеличение содержания ДБФ в покрытиях снижает их электризацию. Такую зависимость электризации от содержания ДБФ можно объяснить эффектом «антипластификации», в результате которой при малых концентрациях ДБФ за счет более плотной упаковки цепей и физического «сшивания» полимера уменьшается электропроводность и возрастает электризация покрытий. Увеличение концентрации ДБФ более 15 мас.ч. способствует усилению подвижности цепей макромолекул полимера и, соответственно, к возрастанию утечки зарядов за счет увеличения электропроводности.

Зависимость поверхностной плотности электростатических зарядов от технологических параметров полимерной матрицы (содержания ПЭПА и ДБФ) имеет строгое физико-химическое обоснование. Экспериментально зафиксированный рост электризации при увеличении содержания отвердителя ПЭПА до критических значений (25–30 мас.ч. для ФАЭД-20/ФАЭИС-30 и 12 мас.ч. для ЭД-16) обусловлен прямой корреляцией между ростом микротвердости и падением электропроводности системы из-за высокой плотности сшивания макромолекул. Падение электризации при избытке ПЭПА доказано эффектом химической пластификации. Аналогично, экстремальный характер кривой при введении пластификатора ДБФ (рост заряда в диапазоне 10–15 мас.ч.) экспериментально подтвержден явлением антипластификации**,** приводящим к аномально плотной упаковке полимерных цепей, росту жесткости и снижению путей утечки электростатического заряда.

Исследования показали, что при фрикционном взаимодействии полимерных покрытий с хлопком-сырцом образующиеся электростатические заряды способствуют активизации поверхностных слоев покрытий и хлопка-сырца и их существенным структурным и физико-химическим изменениям. Об увеличении активности поверхностных слоев покрытий в реакциях термоокисления кислородом воздуха, а также об изменении кристалличности свидетельствуют соответствующие экзотермические пики на термограммах, а также данные рентгеноструктурного анализа и изменения в интенсивности полос поглощения в ИК-спектрах полимерных покрытий, снятых для исходных образцов и после фрикционного взаимодействия с хлопком-сырцом [2; с.235-243].

Показано, что чем выше активность полимера в реакциях термоокисления, на что указывает увеличение оптической плотности полос поглощения, связанных с колебаниями кислородсодержащих групп в ИК-спектрах полимеров, тем меньше полимер электризуется. Отмечены также структурные изменения и в хлопковом волокне, причем электризация активизирует процессы химического взаимодействия продуктов деструкции с хлопковой целлюлозой, о чем свидетельствуют ИК-спектры хлопкового волокна [2; с.235-243].

Показано, что чем выше активность полимера в реакциях термоокисления, на что указывает увеличение оптической плотности полос поглощения, связанных с колебаниями кислородсодержащих групп в ИК-спектрах полимеров, тем меньше полимер электризуется. Отмечены также структурные изменения и в хлопковом волокне, причем электризация активизирует процессы химического взаимодействия продуктов деструкции с хлопковой целлюлозой, о чем свидетельствуют ИК-спектры хлопкового волокна [2; с.235-243].

Прямым доказательством протекания механохимических процессов в зоне фрикционного контакта служат данные ИК-спектроскопии, термогравиметрии и рентгеноструктурного анализа (РСА) исходных и отработанных образцов. На термограммах зафиксированы четкие экзотермические пики, свидетельствующие об интенсификации реакций термоокисления поверхностных слоев покрытий кислородом воздуха под воздействием генерируемого статического электричества. Спектральный анализ показал рост оптической плотности полос поглощения кислородсодержащих функциональных групп в полимерах. В самом хлопковом волокне ИК-спектры зафиксировали появление новых связей, подтверждающих химическое взаимодействие продуктов деструкции полимера с макромолекулами хлопковой целлюлозой**,** активированное трибоэлектрическим полем.

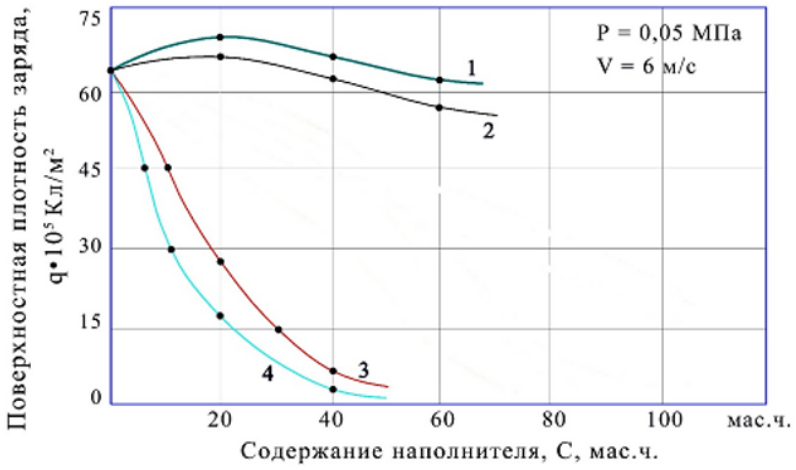
Таким образом, результаты исследований позволили установить основные закономерности электризации полимерных покрытий при трении скольжения с хлопком сырцом в зависимости от вида и природы термореактивных материалов. Как видно из полученных результатов термореактивные полимеры при трении с хлопком-сырцом наиболее быстро 0,04 – 0,06 кс электризуются и значение плотности заряда находится в пределах 64 – 75 $\sigma \cdot 10^6$ Кл/м^2, а полимерных покрытий с хлопком-сырцом электрические заряды длительное время сохраняются на поверхности покрытий. Так, у покрытий из ФАЭД-20, ЭД-16 и ФАЭИС 30 плотность заряда после 6,0 кс находится в пределах 28 – 10 $\sigma \cdot 10^6$ Кл/м^2.

Одним из путей регулирования электрофизических, электростатических и антифрикционных свойств полимерных материалов является введение в их состав электропроводящих и полупроводниковых органоминеральных наполнителей. Кроме того, введение органоминеральных наполнителей позволяет улучшить триботехнические свойства полимерных покрытий за счет оптимального регулирования их физико-механических свойств – микротвердости, адгезии, прочности, температуры стеклования и др.

Далее было исследовано влияние электрофизических свойств и концентрации выбранных наполнителей на процесс электризации полимерных покрытий с хлопком-сырцом.

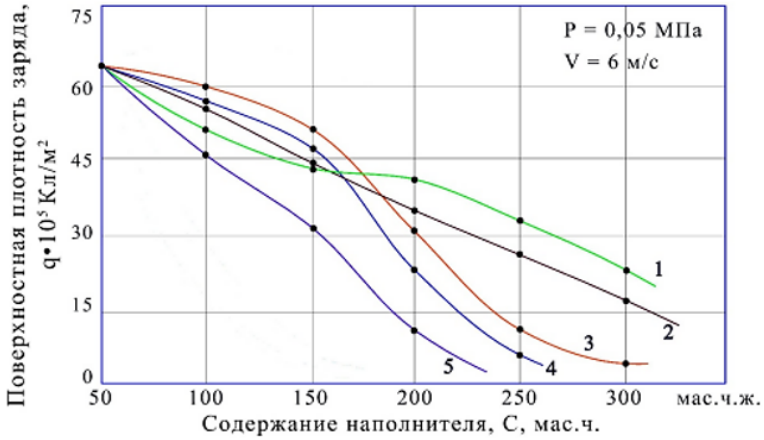
Результаты исследований показали, что при введении наполнителей, независимо от вида полимера и наполнителя, положительная полярность покрытия и отрицательная хлопка-сырца, сохранялись в установившемся режиме трения скольжения. На рис. 1 – 3 пред

ставлены результаты экспериментальных исследований по влиянию содержания наполнителей минеральных (а) и металлических (б) на электризацию выбранных полимерных материалов при трении скольжения с хлопком-сырцом. Как видно, введение минерального наполнителя каолина несколько увеличивают электризацию покрытий при содержании 20 – 40 мас.ч. у ЭД-16, ФАЭД-20 и ФАЭИС-30 и при более высоких концентрациях лишь незначительно уменьшает поверхностью плотность зарядов. Такое влияние каолина на электризацию полимерных покрытий, очевидно, связано с их достаточно высокими электроизоляционными свойствами . Содержание каолина до 20 – 40 мас.ч. в составе ЭД-16, ФАЭД-20 и ФАЭИС-30 не изменяет электрофизических свойств покрытий и в то же время влияет на физико-механические свойства (рис.1, 2, 3,), что и вызывает некоторый рост поверхностной плотности зарядов. Уменьшение электризации покрытий при дальнейшем увеличении содержания каолина очевидно связано с уменьшением $\rho\rho_v$ и $\rho\rho_s$ композиции, так как электрофизические свойства самих наполнителей ниже, чем связующего.



а

1-каолин; 2-тальк; 3-графит; 4-сажа

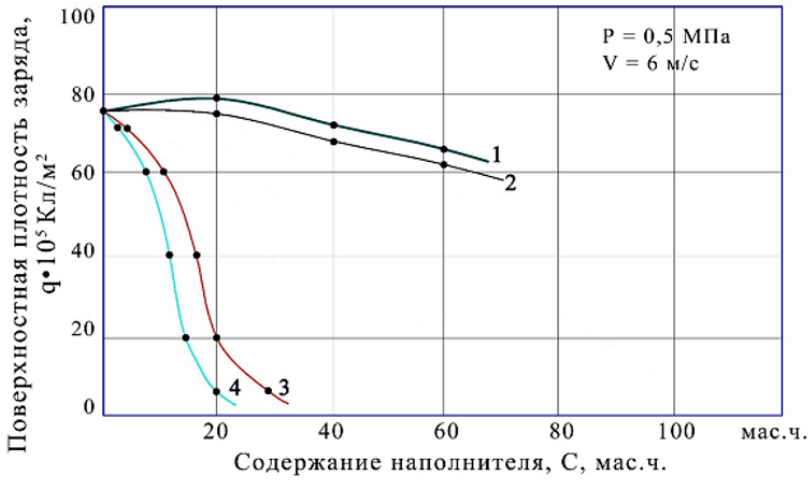


б

1-окись меди; 2-окись железа; 3-железный порошок; 4-алюминиевая пудра;

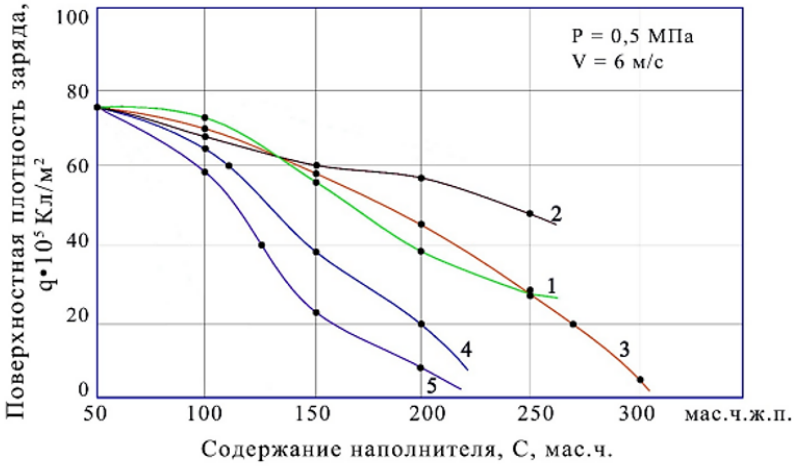
5-бронзовая мука

Рисунок 2. Зависимость поверхностной плотности заряда композиционных полимерных покрытий на основе ЭД-16 от вида и содержания минеральных (а) и металлических (б) наполнителей



а

1-каолин; 2-тальк; 3-графит; 4-сажа

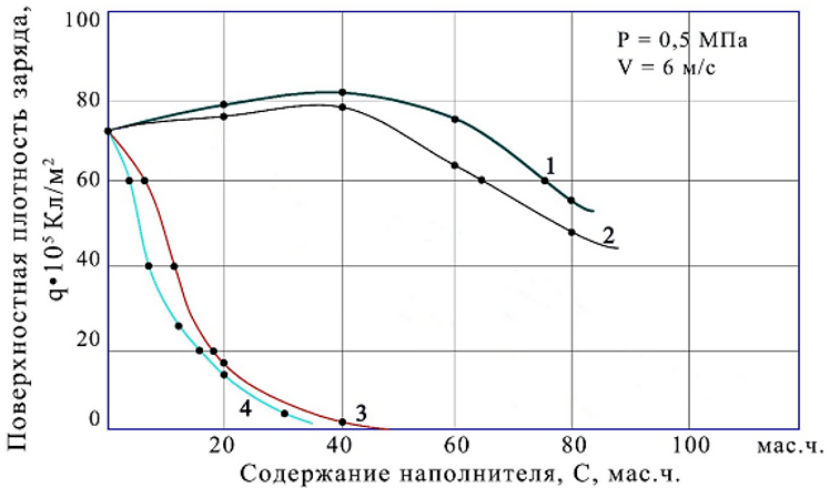


б

1-окись меди; 2-окись железа; 3-железный порошок; 4-алюминиевая пудра;

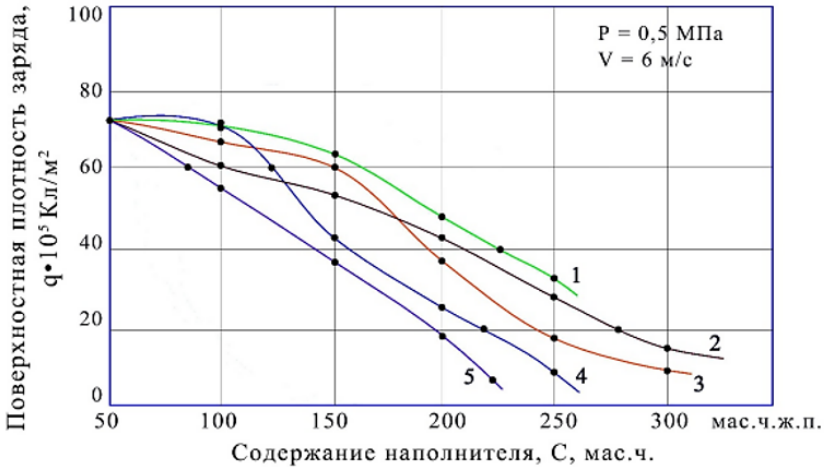
5-бронзовая мука

Рисунок 3. Зависимость поверхностной плотности заряда полимерных покрытий на основе ФАЭИС-30 от вида и содержания минеральных (а) и металлических (б) наполнителей



а

1-каолин; 2-тальк; 3-графит; 4-сажа



б

1-окись меди; 2-окись железа; 3-железный порошок; 4-алюминиевая пудра;

5-бронзовая мука

Рисунок 4. Зависимость поверхностной плотности заряда полимерных покрытий на основе ФАЭД-20 от вида и содержания минеральных (а) и металлических (б) наполнителей

При введении каолина в состав эпоксидных и фурано-эпоксидных полимеров, в процессе термообработки образуются продукты термодеструкции, которые абсорбируясь на поверхности каолина, способствуют образованию пространственной сетки [3; с.129-130], что в значительной мере влияет на электропроводность композиции и соответственно электризацию покрытий. Наибольшее снижение поверхностной плотности зарядов, как и следовало ожидать, наблюдается при введении таких электропроводящих наполнителей, как железный порошок, алюминиевая и бронзовая пудра, сажа и графит.

Причем наиболее эффективно снижают электризацию полимерных покрытий сажа и графит, что обусловлено ее высокой электропроводностью вследствие чего удельное поверхностное и удельное объемное сопротивления полимерных покрытий резко снижается при 10 мас.ч. сажи у ФАЭД-20, ФАЭИС-30 и ЭД-16.

При этом увеличивается пути утечки зарядов и, соответственно, снижается электризация покрытий. Высокая электропроводность полимерных покрытий при введении электропроводящих наполнителей обусловлено образованием цепочечной структуры в объеме полимера. [9;]

При этом общий характер уменьшения поверхностной плотности зарядов с увеличением содержания электропроводящих наполнителей, очевидно, связан с тем, что в трехкомпонентной системе хлопок-сырец-полимер-наполнитель, участки контактирования хлопка-сырца с наполнителем увеличиваются, вследствие чего образующиеся заряды на поверхности полимерного покрытия отводятся по цепочке, образованной электропроводящим наполнителем. Более эффективное воздействие сажи по сравнению с графитом на процессы электризации полимерных покрытий, несмотря на ее большее удельное электрическое сопротивление, связано с взаимодействием полимеров с активной поверхностью частиц сажи вследствие наличия на их поверхности функциональных групп, содержащих двойные связи [9;] и способных образовывать химические связи, особенно с полярными полимерами.

Результаты исследований показали, что сажа эффективнее снижает электризацию ФАЭД-20 и ФАЭИС-30 по сравнению с ЭД-16. Это обусловлено, очевидно, лучшей их совместимостью сажи с ФАЭД-20 и ФАЭИС-30, так как эти смолы менее вязкие и распределение частиц наполнителя происходит более равномерное объему покрытия.

Введение алюминиевой пудры в состав полимерных материалов, несмотря на снижение электризации полимерных покрытий, приводит к ухудшению антифрикционных свойств покрытий. При этом ухудшение физико-механических свойств обусловлено способностью алюминиевой пудры комковаться и образовывать микродефекты. В то же время меньшая способность алюминиевой пудры снижать электризацию по сравнению с сажей связана с ее более высоким электрическим сопротивлением и меньшей активностью взаимодействия с полимерной матрицей.

Окись меди по своим электрофизическим свойствам является [4; с.45-46] полупроводником и поэтому введение ее в состав полимерного покрытия приводило к небольшому снижению электризации и по способности воздействия на электростатическое свойства покрытие занимает промежуточное положение между каолином и алюминиевой пудрой.

Для корректной интерпретации трибоэлектрических процессов необходимо разграничивать электрофизические свойства исходных фаз и готового композита. Исходный хлопок-сырец и чистые термореактивные матрицы (ЭД-16, ФАЭД-20, ФАЭИС-30) являются выраженными диэлектриками с удельным объемным сопротивлением $p_v > 10^{12}$ Ом·м. Вводимые наполнители разделены по своей природе на диэлектрики (каолин, тальк), полупроводники (оксиды металлов) и проводники (металлы, технический углерод, графит).

Экспериментально установлено, что оценка трибоэлектризации только по массовой концентрации (С, мас.ч.) искажает физическую картину. Из-за существенного различия в плотности исходных порошков (для сажи $\gamma \approx 1{,}8$ г/см³, для железного порошка $\gamma \approx 7{,}8$ г/см³) при одинаковом массовом содержании их объемная доля (φ, % об.) в готовом композите различается более чем в 4 раза.

Резкое падение поверхностной плотности зарядов $q_з$ при введении всего 10 мас.ч. сажи (или графита) объясняется достижением порога перколяции (критической объемной доли $ф_{крит}$), при котором наноразмерные частицы технического углерода (30-50 нм) с высоким распределением формируют сплошную пространственную цепочечную сетку в объеме полимера. В то же время для железного порошка ПЖВ из-за его высокой плотности и крупного размера частиц (40-60 мкм) порог протекания ($ф_{крит}$) достигается лишь при высоких массовых наполнениях (более 150–200 мас.ч.), когда крупные глобулы железа соприкасаются друг с другом.

Дополнительным фактором выступает переходное контактное сопротивление на границе раздела «полимерное связующее – наполнитель». Высокая полярность фурано-эпоксидных олигомеров ФАЭД-20 и ФАЭИС-30 способствует снижению потенциального барьера на границе с активной поверхностью сажи, содержащей кислородсодержащие функциональные группы. Это минимизирует контактное сопротивление между частицами наполнителя в готовом композите и облегчает мгновенный отвод наведенного хлопком статического заряда по сформированным проводящим каналам. Удельное поверхностное и удельное объемное сопротивления полимерных покрытий при этом резко снижаются.

Природа полимерных материалов также оказывает влияние на распределение частиц наполнителя в объеме покрытия [11-12]. Так, у менее вязких фурано-эпоксидных покрытий наблюдается более равномерное распределение частиц наполнителей, за исключением железного порошка. Это приводит к более значительному снижению электризации ФАЭД-20 и ФАЭИС-30 по сравнению с ЭД-16.

Заключение

Исследованы электрофизические свойства органоминеральных наполнителей для получения композиционных материалов. Установлено, что выбранные органоминеральные наполнители по своим электрофизическим свойствам вполне подходят для разработки из них антифрикционных композиционных полимерных материалов и покрытий на их основе, обладающих низким электростатическим зарядом.

Исследованы электрофизические свойства термореактивных полимеров ЭД-16, ФАЭД-20 и ФАЭИС-30, а также наполненных органоминеральными наполнителями композиций на их основе. Выявлены закономерности влияния органоминеральных наполнителей на электрофизические свойства композиций на основе ЭД-16, ФАЭД-20 и ФАЭИС-30. При этом минеральные неорганические наполнители повышают электроизоляционные свойства, а углеграфитовые, металлические и оксиды металлов улучшают электропроводность композиционных полимерных материалов и покрытий на их основе.

Изучены процессы электризации полимерных и композиционных полимерных материалов и покрытий на их основе при контактном взаимодействии с хлопком-сырцом в зависимости от вида и природы полимеров и органоминеральных наполнителей. Показано, что под действием температуры, возникающей в зоне трения, незначительно изменяется

теплопроводность композиций на основе ЭД-16, ФАЭД-20 и ФАЭИС-30. Установлены основные закономерности электризации композиционных полимерных покрытий при трении скольжения с хлопком-сырцом зависит от вида и природы полимеров.

Показано, что при введении наполнителей железного порошка, алюминиевой и бронзовой пудры, сажи и графита снижается электризация композиционных полимерных покрытий, что обусловлено их высокой электропроводностью, вследствие чего удельное поверхностное и удельное объемное сопротивления полимерных покрытий резко снижаются.

Разработаны оптимальные составы антифрикционных композиционных полимерных материалов и покрытий на их основе, позволяющих утечки образующихся электрических зарядов, предназначенных для нанесения их на поверхности рабочих органов хлопкоперерабатывающих машин и механизмов, а также исследованы их электрофизические и физико-механические свойства, удовлетворяющие требованиям, предъявляемым к материалам рабочих органов машин и механизмов, работающих в условиях контактного взаимодействия с хлопко-сырцом.

Список литературы

1. Амиров Г.А. Исследование влияния средств механизации и пневмотранспортных установок на качество волокна: Автореферат дис…. канд.тех. наук. – Ташкент, 1976. – 26 с.
2. Дехант И., Данц Р., Киммер В., Шмольке Р. Инфракрасная спектроскопия полимеров. – М.: Химия, 1976. – 472 с.
3. Джалилов Н.Х., Негматов С.С. и др. Электризация композиционных полимерных материалов на основе фурано-эпоксидных олигомеров при трении с хлопком-сырцом // Композиционные полимерные материалы и их применение в народном хозяйстве: Тез.докл. I Всесоюзн.конф. – 1983. – С. 129–130.
4. Джалилов Н.Х., Негматов С.С. и др. Исследование влияния электропроводящих наполнителей на трибоэлектрические процессы при взаимодействии полимерных покрытий с хлопком-сырцом // Механоэмиссия и механохимиия твердых тел: Тез. докл. YIII Всесоюзн. Симпозиума. – 1981. – С. 45–46.
5. Негматов С.С., Джумабаев А.Б., Джалилов Н.Х. Физико-химические процессы при фрикционном взаимодействии композиционных полимерных материалов с волокнистой массой // «Триботехника-87»: Сб.докл.конф. – 1987. – С. 159–166.
6. Раджапов У.Р. Исследование пневмотранспорта хлопковых семян в горизонтальном трубопроводе: Автореферат дис…. канд.тех наук. – Ташкент, 1974. – 23 с.
7. Тихомиров Г.А. Влияние влажности хлопка-сырца на процесс джинирования. Обзорная информация. – Ташкент: УзНИИНТИ, 1970. – 32 с.
8. Шполянский Д.М. Комплексная механизация уборки хлопка. – М.: Высшея школа, 1972. – 319 с.
9. Stauffer D., Aharony A. Introduction to Percolation Theory. 2nd ed. – London: Taylor & Francis, 1994.

10. Šutka A., Lapčinskis L., He D., Kim H., Berry J.D., Bai J., Knite M., Ellis A.V., Jeong C.K., Sherrell P.C. Engineering Polymer Interfaces: A Review toward Controlling Triboelectric Surface Charge // Advanced Materials Interfaces. – 2023. – T. 10, № 26. – Art. 2300323. – DOI: 10.1002/admi.202300323.
11. Živičnjak J., Rogale D. Applicable measurement systems for determining the amount of electrostatic charge generated on textile materials // Tekstil. – 2022. – T. 71, № 2. – P. 113–119.
12. Sharma S., Verma A., Rangappa S.M., Siengchin S., Ogata S. Recent progressive developments in conductive-fillers based polymer nanocomposites (CFPNC's) and conducting polymeric nanocomposites (CPNC's) for multifaceted sensing applications // Journal of Materials Research and Technology. – 2023. – T. 26. – P. 5921–5974. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.08.300.
13. Джалилов Н.Х. Исследование закономерностей процесса электризации полимерных покрытий при фрикционном взаимодействии с хлопком-сырцом: Автореф. дис. … канд. техн. наук.- Ташкент. – 1984. – 21 с.

References

1. Amirov G.A. [Study of the influence of mechanization means and pneumatic transport installations on fiber quality: Author's abstract of dissertation.. Candidate of Technical Sciences]. – Tashkent, 1976. – 26 s (In Russ.).
2. Dekhant I., Dants R., Kimmer V., Shmol'ke R. [Infrared spectroscopy of polymers]. – M.: Khimiya, 1976. – 472 s (In Russ.).
3. Dzhalilov N.Kh., Negmatov S.S. i dr. [Electrification of composite polymer materials based on furan-epoxy oligomers during friction with raw cotton] // Kompozitsionnye polimernye materialy i ikh primenenie v narodnom khozyajstve: Tez.dokl. I Vsesoyuzn.konf. – 1983. (In Russ.).
4. Dzhalilov N.Kh., Negmatov S.S. i dr. [Study of the influence of electrically conductive fillers on triboelectric processes during the interaction of polymer coatings with raw cotton] // Mekhanoemissiya i mekhanokhimiiya tverdykh tel: Tez. dokl. YIII Vsesoyuzn. Simpoziuma. – 1981. (In Russ.).
5. Negmatov S.S., Dzhumabaev A.B., Dzhalilov N.Kh. [Physicochemical processes during frictional interaction of composite polymer materials with fibrous mass] // «Tribotekhnika-87»: Sb.dokl.konf. – 1987. (In Russ.).
6. Radzhapov U.R. [Study of pneumatic transport of cotton seeds in a horizontal pipeline: Author's abstract of dissertation.. Candidate of Technical Sciences]. – Tashkent, 1974. – 23 s (In Russ.).
7. Tikhomirov G.A. [Effect of raw cotton moisture content on the ginning process. Review information]. – Tashkent: UzNIINTI, 1970. – 32 s (In Russ.).
8. Shpolyanskij D.M. [Comprehensive mechanization of cotton harvesting]. – M.: Vyssheya shkola, 1972. – 319 s (In Russ.).
9. Stauffer D., Aharony A. Introduction to Percolation Theory. 2nd ed. – London: Taylor & Francis, 1994.

10. Šutka A., Lapčinskis L., He D., Kim H., Berry J.D., Bai J., Knite M., Ellis A.V., Jeong C.K., Sherrell P.C. Engineering Polymer Interfaces: A Review toward Controlling Triboelectric Surface Charge // Advanced Materials Interfaces. – 2023. – Vol. 10, No. 26. – Art. 2300323. – DOI: 10.1002/admi.202300323.
11. Živičnjak J., Rogale D. Applicable measurement systems for determining the amount of electrostatic charge generated on textile materials // Tekstil. – 2022. – Vol. 71, No. 2. – P. 113–119.
12. Sharma S., Verma A., Rangappa S.M., Siengchin S., Ogata S. Recent progressive developments in conductive-fillers based polymer nanocomposites (CFPNC's) and conducting polymeric nanocomposites (CPNC's) for multifaceted sensing applications // Journal of Materials Research and Technology. – 2023. – Vol. 26. – P. 5921–5974. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.08.300.
13. Dzhalilov N.Kh. Investigation of the Regularities of the Electrification of Polymer Coatings during Frictional Interaction with Raw Cotton: Abstract of the Dissertation for the Degree of Candidate of Technical Sciences. Tashkent. – 1984. – 21 P.

Статья поступила в редакцию: 10.10.2026
Статья принята к публикации: 16.10.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 544.723.2:546.79

DOI: 10.32743/UniTech.2026.151.10.23572

Влияние суммы примесей на сорбцию урана анионитом АМП

Ражаббоев Ибодулла Муродуллаевич
д-р. техн. наук, доц.
Навоийский государственный горно-технологический университет
Республика Узбекистан, г. Навои
E-mail: jahon.gir2015@mail.ru

Influence of impurity sums on uranium sorption by the AMP anion exchanger

Razhabboev Ibodulla Murodullaevich
doctor of since, Navoi state university of mines and tecnologies
Republic of Uzbekistan, Navoi

Аннотация

В данной статье представлены исследования по сорбции урана анионитом АМП при совместном присутствии урана и изучаемых примесей. При сорбционном извлечении урана из растворов используют в основном аниониты. Сопутствующие примеси в продуктивных растворах ведут себя неодинаково. Катионы щелочных и щелочноземельных элементов, ионы меди, железа, кобальта, марганца практически не сорбируются. Сульфат-, нитрат-, хлорид-, фторид- и фосфат-ионы хорошо сорбируются и являются депрессорами. Расширение числа вовлекаемых в отработку месторождений различными минералами составом уранового оруденения обуславливает появление в продуктивных растворах подземного выщелачивания наряду с ураном других элементов, в том числе и нежелательных, ранее не встречавшихся в практике обработки месторождений. В работе исследовано влияния суммы примесей на сорбцию урана анионитом АМП.

Сорбция урана и депрессирующих ионов (сульфат, нитрат, хлорид, фосфат, силикат, железо, марганец, алюминий и кальций) на смоле АМП проводилась в условиях статической серии.

Концентрация изучаемых компонентов в системах составляла по 0,15; 0,3; 0,6; 2 г/л каждого элемента. В состав систем вводили хлор, фосфат, железо трехвалентное, железо двухвалентное, алюминий, марганец, кремний в виде солей.

Библиографическое описание: Ражаббоев И.М. Влияние суммы примесей на сорбцию урана анионитом АМП // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23572

Abstract

This article presents research on uranium sorption by the AMP anion exchanger in the presence of uranium and the studied impurities. When extracting uranium from solutions via sorption, anion exchangers are primarily used. Accompanying impurities in productive solutions behave differently. Cations of alkaline and alkaline-earth elements, as well as ions of copper, iron, cobalt, and manganese, are practically not absorbed. Sulfate, nitrate, chloride, fluoride, and phosphate ions are well-sorbed and are depressants. The expansion of the number of deposits involving various minerals in the composition of uranium mineralization leads to the appearance of other elements in productive solutions of underground leaching alongside uranium, including undesirable ones that were not previously encountered in the practice of deposit processing. The study investigated the influence of impurity sums on uranium sorption by the AMP anion exchanger.

Sorption of uranium and depressant ions (sulfate, nitrate, chloride, phosphate, silicate, iron, manganese, aluminum, and calcium) onto the AMP resin was carried out under static series conditions.

The concentrations of the studied components in the systems were 0.15; 0.3; 0.6; 2 g/l of each element. Chlorine, phosphate, trivalent iron, divalent iron, aluminum, manganese, and silicon in the form of soda were added to the systems.

Ключевые слова: уран, подземное выщелачивание, депрессанты, примеси, сорбция, анионит, емкость.

Keywords: uranium, underground leaching, depressants, influences, sorption, anion exchanger, capacity.

Введение

Уран продолжает играть значительную роль в мировой экономике и энергетике, несмотря на происходящие перемены в источниках энергии [1, с. 115]. Мировая добыча урана в 2024 г. составила около 60 тыс. т, что на 27 % больше, чем в 2021 г. По данным ведущих мировых аналитиков по урану прогнозирует, что с 2028 года спрос на уран будет превышать предложение из известных источников [2, с. 277].

В настоящее время одним из самых эффективных и экологически безопасных методов добычи урана является метод скважинного подземного выщелачивания (СПВ) [3, с. 47, 4, с. 10]. Более половины урана добывается методом скважинного подземного выщелачивания [5, с. 4]. Этот метод в настоящее время широко применяется при добыче урана [6, с. 1394]. Метод подразумевает закачку раствора реагентов непосредственно в рудный пласт и выщелачивание урана на месте, без подъема руды на поверхность [7, с. 34].

При сорбционном извлечении урана на анионитах сопутствующие ему примеси ведут себя неодинаково. Так, катионы щелочных и щелочноземельных металлов, а также ионы двухвалентной меди, железа, кобальта и марганца не сорбируются и являются балластными примесями. Ряд анионов, напротив, хорошо сорбируется на анионитах, составляя конкуренцию извлекаемым ионам урана. К ним относятся анионы сульфата, нитрата, хлорида, фторида и фосфата. Эти анионы относят к разряду депрессирующих примесей. И,

наконец, существуют ионы с повышенным сродством к сильноосновным анионитам, которые, накапливаясь со временем в анионитах, отравляют их, т. е. лишают их способности поглощать полезные компоненты, в частности уран [8, с. 6].

Материалы и методы

Сорбция урана и депрессирующих ионов (сульфат, нитрат, хлорид, фосфат, силикат, железо, марганец, алюминий и кальций) на смоле АМП проводилась в условиях статической серии. Сернокислые растворы исследуемых компонентов контактировали с товарной анионообменной смолой (АМП) в пачуковых реакторах с воздушным перемешиванием при pH=1,2. Время контакта равно 24 часам, соотношение объема смолы к объему раствора составляет 1:400 (5 мл смолы и 2000 мл раствора), а концентрация нейтральных сульфатов равна 7 г/л. Добавление нейтральных сульфатов к исследуемым растворам было использовано для более адекватного моделирования исследуемых растворов к производственным растворам процесса ПВ, содержащим в среднем 10 г/л сульфат-ионов, в том числе 3 г/л свободной серной кислоты.

Концентрация изучаемых компонентов в системах составляла по 0,15; 0,3;0,6; 2 г/л каждого элемента. В состав систем вводили хлор, фосфат, железо трехвалентное, железо двухвалентное, алюминий, марганец, кремний в виде солей (NaCl, NaH_2PO_4, $Fe_2(SO_4)_3$, $FeSO_4$, $Al_2(SO_4)_3$, $MnSO_4$, Na_2SiO_3 и т.д.).

Результаты и обсуждения

Сорбцию урана из многокомпонентной системы проводили в присутствии нитрат-иона и без него, что обуславливалось необходимостью изучения сорбции урана в сернокислой среде и при небольших добавках азотной кислоты, добавляемой в процесс для защиты оборудования от коррозии. Содержание нитрат-иона равнялось концентрации примесей, входящих в состав смеси и составила 0,15; 0,6; 2 г/л.

Содержание каждого компонента в сумме примесей представлен в табл. 1.

Таблица 1. Содержание каждого компонента в сумме примесей

Образец	Содержание компонентов
I	0 г/л
II	0,15 г/л
III	0,5 г/л +0,15 г/л NO_3
IV	0,3 г/л
V	0,6 г/л
VI	0,6 г/л +0,6 г/л NO_3
VII	2 г/л
VIII	2 г/л + 2 г/л NO_3

В растворах содержание нитрат-иона в жидкой фазе меняется от 0,3 – 1 г/л. Результаты опытов приводятся в таблицах 2 – 3 и на рис.1.

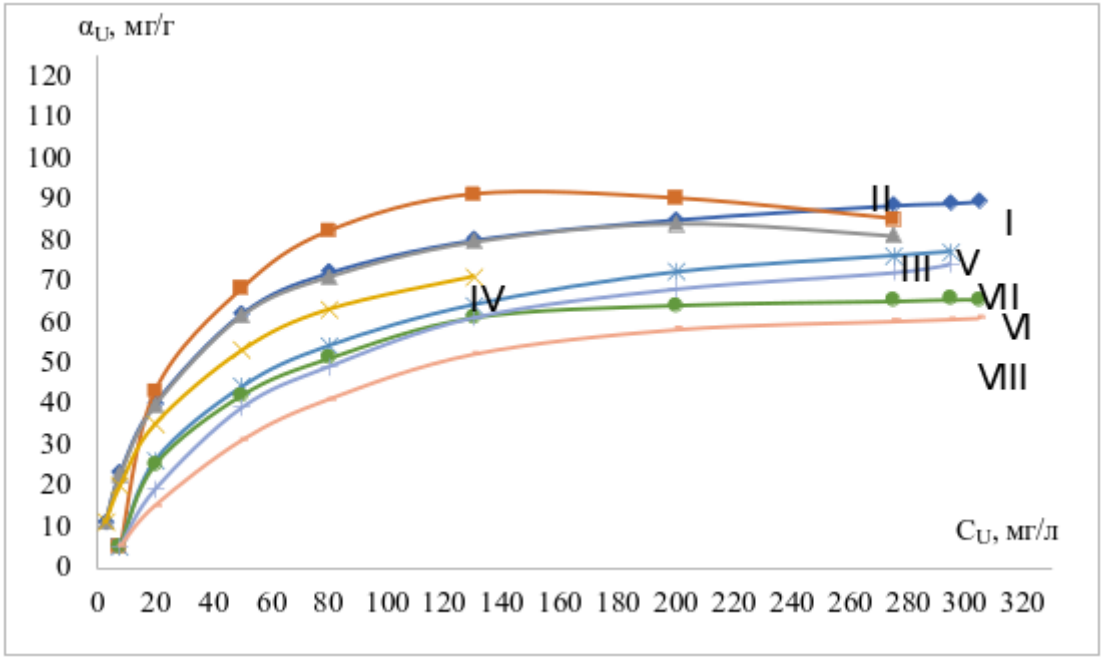


Рисунок 1. Изотермы сорбции урана на анионите АМП при совместном содержании в растворе примесей

Примечание: α_U, мг/г — сорбционная ёмкость по урану. α_U, мг/л — концентрация урана в растворе.

I кривая – изотерма сорбции урана в отсутствии примесей.

II кривая – изотерма сорбции урана в присутствии примесей концентраций 0,15 г/л каждой без нитрат-иона. Как видно из рисунка, смесь примесей таких концентраций оказывает положительное влияние на сорбцию урана анионитом при концентрации урана в продуктивных растворе от 0,020 г/л до 0,260 г/л.

III кривая-изотерма сорбции урана в присутствии суммы примесей концентрацией 0,15 г/л каждой и дополнительно нитрат-иона такой же концентрации. Как видно из рис.1, такой количественный состав примесей не снижает емкости анионита по урану в пределах концентрации урана от 0,006 г/л до 0,200 г/л. При увеличении концентрации урана в растворе более 0,200 г/л емкости анионита по урану в присутствии смеси такого состава начинают снижаться, но незначительно. Присутствие нитрат-иона в смеси с содержанием 0,15 г/л каждого изучаемого компонента понижает емкость анионита по урану. Изотерма сорбции урана в присутствии нитрат-иона для смеси данной концентрации 0,15 г/л практически совпала с кривой I.

Таким образом добавление нитрат-иона в количестве 0,15 г/л в смесь, содержащую по 0,15 г/л хлор-иона, фосфата, кремния, алюминия, железа снижает емкость ионита на столько на сколько сумма этих компонентов без нитрат-иона увеличивает её.

V кривая-изотерма сорбции урана анионитом АМІ из раствора, содержащего примеси в количестве по 0,3 г/л каждого компонентов отсутствии нитрат – иона. Как видно из рис.1 емкости анионита по урану в присутствии смеси выше указанного состава уменьшаются на 4 мг/г при концентрации урана в растворе 0,005 г/л и на 7 мг/г при концентрации урана в растворе 0,150 г/л, что соответствует снижению емкости на 25 % и 8 %.

V кривая-изотерма сорбции урана из смеси, содержащей по 0,6 г/л каждой примеси, в отсутствии нитрат – иона. Как видно из рис.1, емкость анионита по урану из смеси такого состава снижается на 11 – 10 мг/г. Падение емкости составляет 63 – 11 % при изменении концентрации урана с 0,005 г/л до 0,200 г/л.

Добавка нитрат-иона в количестве 0,6 г/л к смеси, содержащей по 0,6 каждого компонента (VI кривая), способствует снижению емкости анионита по урану 5 – 10 %.

С увеличением концентрации элементов до 2 г/л каждого емкость сорбента еще более уменьшается и особенно в присутствии нитрат – иона. (Кривые VII и VII)

Из таблицы 2 видно, что емкость анионита по урану снижается с увеличением солевого состава смеси по концентрации изучаемых компонентов, особенно при низких значениях концентрации урана. Добавление нитрат-иона в систему еще более депрессирует сорбцию урана.

Совместное присутствие примесей в большей степени депреесирует сорбцию урана, чем каждый отдельно взятый компонент. Однако, при равновесной концентрации урана 0,2 – 0,3г/л емкость ионита по урану в самых неблагоприятных системах по изучаемым примесям составляет 65 мг/г.

Селективность смолы по отношению к урану прослеживается и при сорбции урана из продуктивных растворов.

Таблица 2. Изменение емкости анионита АМП по урану из систем, содержащих уран и сумму примесей

Содержание урана в растворе, г/л	**Снижение емкости смолы по урану, %**				
	Раствор, содержащий примесей г/л				
	0,3	**0,6**	**0,6**	**2**	**2**
	без NO_3^-	**без NO_3^-**	**с NO_3^-**	**без NO_3^-**	**с NO_3^-**
0,008	- 14,0	- 63,0	- 68,0	- 70	- 72,0
0,010	- 12,0	- 52,0	- 58,0	- 60	- 68,0
0,020	- 10,0	-32,0	- 37,0	- 48,0	-59,0
0,050	-10,0	- 25,0	- 29,0	-37,0	-38,0
0,100	- 8,0	-21,0	- 25,0	- 27,0	-32,0
0,150	-	-15,0	- 22,0	- 20,0	- 32,0
0,200	-	-12,0	- 23,0	- 17,0	-32,0
0,300	-	-5,0	- 21,0	- 9,0	- 31,0

Примечание: знак «—» указывает на снижение емкости.

Солевой состав производственных сернокислых растворов после предварительного выщелачивания представлен в табл. 3.

Таблица 3. Солевой состав жидкой фазы сернокислых растворов, полученных при поземное выщелачивании урана

№ пп	**Содержание компонентов, г/л**										
	U	**Fe^{3+}**	**Fe^{2+}**	**Si**	**NO^{3-}**	**SO_4^{2-}**	**P**	**Ca**	**Cl^-**	**Mn^{3+}**	**Al^{3+}**
1.	0,319	0,294	0,070	0,272	0,827	-	0,079	0,660	0,300	0,530	0,014
2.	0,312	0,306	0,077	0,110	0,827	-	0,030	0,700	0,298	0,320	0,023

№ пп	Содержание компонентов, г/л										
	U	**Fe^{3+}**	**Fe^{2+}**	**Si**	**NO^{3-}**	**SO_4^{2-}**	**P**	**Ca**	**Cl^-**	**Mn^{3+}**	**Al^{3+}**
3.	0, 10	0,11 2	0,759	0,123	0, 50	-	0,120	0,39	0,390	-	0,121
4.	0,435	0.350	0,602	0,168	0,220	-	0,138	0,460		0,58	0,155
5.	0,750	0,238	0,448	0,180	0,145	-	0,156	0,510	0,834	0,81	0,256
6.	0,395	0,700	0,250	0,338	0,252	-	0,170	0,320	0,150	0,440	0,175
7.	0,500	0,560	0,336	0,290	0,004	13,71	0,200	0,450	0,071	0,510	0,108
8.	0,400	0,420	0,700	0,112	0,400	7,87	0,148	-	0,301	0,99	0,093

Из таблицы 3 видно, что содержание урана в растворе колеблется в пределах 0,1 – 0,5 г/л, железа двухвалентного 0,07 – 0,7 г/л. железа трехвалентного 0,07 – 0,7 г/л, кремния 0,085 – 0,3 г/л. Фосфора 0,08 – 0,2 г/л, хлора 0,3 г/л, алюминия 0,01 – 0,164 г/л, сульфата 4 – 13 г/л, нитрата 0,3 – 1,5 г/л. Основными примесями, превышающими концентрацию урана в растворе являются железо, нитрат-ион, сульфат-ион.

Состав анионита при сорбции урана из таких продуктивных растворов представлен в таблице 4.

Таблица 4. Состав анионита АМП при сорбции урана из продуктивных растворов

№ пп	Содержание компонентов, мг/г									
1.	U	Fe^{3+}	Ca	P	NO_3^-	Mn^+	SO_4^{2-}	Si	Al^{3+}	Cl^-
2.	43,8	2,01	4,45	1,64	12,3	0,014	108	2,48	-	-
3.	55,1	1,54	3,3	1,75	10,4	-	107	2,51	-	-
4.	54	0,61	2,45	2,32	12,7	-	109	1,2	0,011	1,78
5.	52	1,39	1,1	5,6	4,8	-	125	2,1	0,27	3,55
6.	51	0,59	0,4	1,1	13	-	-	-	0,19	2,66
7.	52.8	0,5	-	2,1	5,8	-	138	-	0,13	-
8.	47,5	0,4	-	8	10,4	-	100	-	0,3	1,1

Как видно из таблицы 4 анионит имеет высокую емкость по сульфат-иону. Содержание урана в анионите превышает в 53 раза содержание железа, в 19 раз содержание фосфора, в 5 раз нитрат-иона, в 10 раз содержание кремния, в 326 раз содержание алюминия.

Выводы

Таким образом анионит АМП довольно селективно сорбирует уран. Совместное присутствие примесей (хлора, фосфора, железа, кремния; алюминия, марганца) отрицательно влияет на сорбцию урану. При равновесной концентрации урана в растворе 0,005 г/л совместное присутствие примесей, в количестве 0,3 г/л каждой снижает емкость ионита по урану на 14 %. Увеличение концентрации каждой примеси до 0,6 г/л приводит к снижению емкости ионита по урану на 63 %. Дальнейшее увеличение концентрации каждой из примесей до 2 г/л вызывает снижение емкости ионита по урану на 70 %.

Список литературы

1. Мирошниченко И.В. Текущие тенденции и будущее мировой урановой промышленности // Известия Уральского государственного горного университета. – 2025. – С. 115–119.
2. Халимов И.У., Каримов Н.М., Муродуллаева М.У. Перспективы отработки остаточных запасов урана из отработанных блоков подземного выщелачивания // Новые идеи в науках о Земле: материалы XI Международной научной конференции. – М.: Издательство МГРИ, 2025. – С. 277–280.
3. Иванов А.Г., Арсентьев Ю.А., Гладышев А.В., Михайлов А.Н., Гурулев Е.А., Иванов Д.А. К вопросу повышения качества скважин скважинного подземного выщелачивания урана в криолитозоне // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2024. – Т. 30, № 2. – С. 47–61. – DOI: 10.21209/2227-9245-2024-30-2-47-61.
4. Хасанов А.С., Эшанкулова Г.Р. История элемента урана и перспективы развития атомной энергетики в Узбекистане // Цифровые технологии в промышленности. 28 июня. – 2026. – Т. 4, № 2. – С. 10–18. – DOI: 10.70769/3030–3214.SRT.4.2.2026.25.
5. Бойцов А.В. Состояние и перспективы развития мировой сырьевой базы и производства урана // Разведка и охрана недр. – 2025. – № 5. – С. 4–11.
6. Ядгаров И., Мирходжаев Б.И. Метод подземного выщелачивания урана в Узбекистане // Экономика и социум. – 2025. – № 2 (129). – С. 1394–1398.
7. Хамидов С.Б., Каримов Н.М., Намозбоева Д.Н., Утаев С.М. Физико-химические и микробиологические методы интенсификации подземного выщелачивания урана из слабопроницаемых руд // Universum: технические науки. – 2025. – № 4 (133). – С. 34–40.
8. Шарафутдинов У.З., Ражаббоев И.М., Эшонова Г.А., Юлдашев Ш.Ш. Исследования влияния фосфат-ионов на процесс получения урана // Universum: технические науки. – 2023. – № 7 (112). – С. 5–9.

References

1. Miroshnichenko I.V. Current trends and the future of the global uranium industry // News of the Ural State Mining University. – 2025. – No. 3 (79). – P. 115–119.
2. Khalimov I.U., Karimov N.M., Murodullaeva M.U. Prospects for the development of residual uranium reserves from depleted blocks of in-situ leaching // New Ideas in Earth Sciences: Proceedings of the XI International Scientific Conference. – Moscow: MGRI Publishing House, 2025. – P. 277–280.
3. Ivanov A.G., Arsentyev Yu. A., Gladyshev A.V., Mikhailov A.N., Gurulev E.A., Ivanov D.A. On the issue of improving the quality of wells for in-situ leaching of uranium in the cryolithozone // Transbaikal State University Journal. – 2024. – Vol. 30, No. 2. – P. 47–61. – DOI: 10.21209/2227-9245-2024-30-2-47-61.
4. Khasanov A.S., Eshankulova G.R. History of the uranium element and prospects for the development of nuclear energy in Uzbekistan // Digital Technologies in Industry. June 28. – 2026. – Vol. 4, No. 2. – P. 10–18. – DOI: 10.70769/3030–3214.SRT.4.2.2026.25.

5. Boytsov A.V. Status and prospects of global uranium resources and production development // Prospecting and Protection of Mineral Resources. – 2025. – No. 5. – P. 4–11.
6. Yadgarov I., Mirkhodjaev B.I. Method of underground leaching of uranium in Uzbekistan // Economy and Society. – 2025. – No. 2 (129). – P. 1394–1398.
7. Khamidov S.B., Karimov N.M., Namozboeva D.N., Utaev S.M. Physicochemical and microbiological methods for intensifying in-situ leaching of uranium from low-permeability ores // Universum: Technical Sciences. – 2025. – No. 4 (133). – P. 34–40.
8. Sharafutdinov U.Z., Rajabboev I.M., Eshonova G.A., Yuldashev Sh. Sh. Studies of the influence of phosphate ions on the uranium production process // Universum: Technical Sciences. – 2023. – No. 7 (112). – P. 5–9.

Статья поступила в редакцию: 02.09.2026
Статья принята к публикации: 09.10.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 666.9+622.245.4

Влияние микроремнезема на процесс твердение облегчённых тампонажных цементных растворов

Талипов Нигматулла Хамидович
д-р техн. наук, проф.
гл. науч. сотр. Государственного учреждения "Фан ва тараккиёт" Ташкентский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: bozorboyev1983@mail.ru
Панжиев Олимжон Холлиевич
докторант
Государственного учреждения "Фан ва тараккиёт" Ташкентский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Салимова Саодат Ашуровна
докторант
Государственного учреждения "Фан ва тараккиёт" Ташкентский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Абед Нодира Сойибжоновна
д-р техн. наук, проф., директор
Государственного учреждения "Фан ва тараккиёт" Ташкентский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Туляганова Васила Сунатиллаевна
д-р техн. наук, проф.
зав. лаб. Государственного учреждения "Фан ва тараккиёт" Ташкентский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Аликабулов Шухрат Абдумаликович
д-р техн. наук, проф.
Джизакский государственный политехнический институт
Республика Узбекистан, г. Джизак
Муллажонов Тулкин Тохтабоевич
соискатель
Государственного учреждения "Фан ва тараккиёт" Ташкентский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Ражабов Ёркинжон Сайфиддин угли
соискатель
Государственного учреждения "Фан ва тараккиёт" Ташкентский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Библиографическое описание: Влияние микроремнезема на процесс твердение облегчённых тампонажных цементных растворов // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Талипов Н.Х. [и др.]. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23523

The effect of microsilica on the hardening process of lightweight cement slurries for well cementing

Talipov Nigmatulla Khamidovich
Dr. Tech. sciences, prof.
Ch. scientific co-workers State institution "Fan va Tarakkiyot" Tashkent State Technical University
Republic of Uzbekistan, Tashkent
Panzhiev Olimjon Hollievich
Doctoral student
State institution "Fan va Tarakkiyot"
Tashkent State Technical University
Republic of Uzbekistan, Tashkent
Salimova Saodat Ashurovna
Doctoral student
State institution "Fan va Tarakkiyot" Tashkent State Technical University
Republic of Uzbekistan, Tashkent
Abed Nodira Soyibzhonovna
Dr. Tech. sciences, prof., director
State institution "Fan va Tarakkiyot" Tashkent State Technical University
Republic of Uzbekistan, Tashkent
Tulyaganova Vasila Sunatillaevna
Dr. Tech. sciences, prof.
head lab. State institution "Fan va Tarakkiyot" Tashkent State Technical University
Republic of Uzbekistan, Tashkent
Alikabulov Shukhrat Abdumalikovich
Dr. Tech. sciences, prof. Jizzakh State Polytechnic Institute
Republic of Uzbekistan, Jizzakh
Mullajonov Tulkin Tokhtaboyevich
Applicant (Degree Candidate)
State Institution "Fan va taraqqiyot" ("Science and Development"),
Tashkent State Technical University
Republic of Uzbekistan, Tashkent
Rajabov Yorkinjon Sayfiddin ugli
Applicant (Degree Candidate)
State Institution "Fan va taraqqiyot"
("Science and Development"),
Tashkent State Technical University
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

В работе изложены результаты изучение процесса твердения растворных смесей на основе облегчённых тампонажных цементов, полученные с применением микрокремнезёма в качестве активной минеральной добавки. Установлено, что при смешивании облегченного тампонажного цемента с водой происходит процесс растворение композиционного цемента, который переходит в пересыщенный раствор и начинается процесс схватывания и гидратация. Показано, что начальные сроки схватывания растворной смесь происходит процесс загустевание растворной смеси. В процессе загустевание начинается формирование кристаллическая структура гидроалюминатов и гидроферритов кальция. Установлено, что переход растворной смеси в твёрдое состояние означает конец схватывания и начало процесса твердения. Показано, что процесс твердения цементных композиции после затворения водой начинаются химические реакции, где происходит образованием

гидросиликата кальция. Установлено, что в начальной период процессе твердения цементной растворной смеси происходит процесс образование гидратных соединение мономинералов и формирование структуры цементного камня, при этом тонкодисперсные частиц микрокремнезема заполняют объем между грубодисперсными частицами гидратных соединение мономинералов цемента. Также установлено, что кристаллизация Ca(OH)2 из пересыщенного раствора цементной композиции понижает концентрацию гидроксида кальция в растворе.

Abstract

The work presents the results of studying the hardening process of mortar mixtures based on lightweight tamponade cements obtained using microcrystalline as an active mineral additive. It has been established that when the lightened tamponade cement is mixed with water, the dissolution process of the composite cement occurs, which transitions into a supersaturated solution and begins the process of hardening and hydration. It has been shown that the initial time for the solution mixture to set is the thickening process of the solution mixture. During the thickening process, the crystalline structure of calcium hydroaluminates and hydroferrites begins to form. It has been established that the transition of the solution mixture into a solid state signifies the end of hardening and the beginning of the solidification process. It has been shown that the hardening process of cement compositions begins with chemical reactions, where the formation of calcium hydrosilicate occurs. It has been established that during the initial period of cement mortar hardening, the process of hydrate monomineral compound formation and the formation of cement stone structure occurs, while fine-dispersed microsilica particles fill the volume between coarse-dispersed hydrate monomineral cement compound particles. It was also established that the crystallization of Ca (OH) 2 from the supersaturated cement composition solution reduces the concentration of calcium hydroxide in the solution.

Ключевые слова: цемент, микрокрокремнезёма композиционный вяжущий, облегчённый тампонажный цемент, сроки схватывания, текучести, гидратация и твердения, формирование структуры, кристаллическая структура, фазовый состав, гидроксид кальция.

Keywords: cement, microcrystalline composite binder, lightweight tamponade cement, hardening time, fluidity, hydration and hardening, structure formation, crystalline structure, phase composition, calcium hydroxide.

Введение

Современная промышленность предлагает большой ассортимент облегченных цементов, где в качестве облегчающей добавки используют минеральные наполнители, пуццолановые добавки, модифицирующие химические добавки. Добавки используемые для снижения плотности тампонажного материала и раствора на их основе [1,2,3].

Цементы низкой плотности используется в сложных геологических условиях с наличием пластов, склонных к гидроразрывам. В таком случае в цемент вводят добавки низкой плотности, такие как зола ТЭЦ, опока, трепел, диатомиты и др. Известно, что для улучшения процесса закачивание растворных смесей в тампонажные цементы водят минеральные добавки низкой плотности, так как такую массу легче закачивать, она будет

проявлять адгезионные свойства к старому основанию оболочки и заполнять все дефекты. Тем более в таких ремонтных тампонажных смесях зафиксирован расширяющийся эффект [3, 4, 5].

Известно, что для обеспечения текучести тампонажного раствора объем воды может превышать объем сухих компонентов. Слишком большое количество воды снижает конечную прочность камня. Для регулирования процесса схватывания и управления процесса твердения тампонажных цементов используются различные наполнители. Наполнители с низкой плотности облегчает тампонажного цемента и положительно влияет на физико-механические и эксплуатационные свойства растворных смесей при цементировании скважин. Известно, что цемент при твердение имеет тенденцию к деформационным изменениям, к усадке, что нежелательно применение для цементирование обсадных колон, а также для работ по креплению скважин. Применение тампонажных растворов усложняет задачу, ввиду образования капиллярных пор в цементном камне. Целью настоящей работы является изучение влияние кремнеземистого активной добавки- микрокремнезема на процесса твердение и формирование структуры гидратных соединение цементных минералов в растворных смесях на основе облегченных тампонажных цементов [4, 5].

Объекты и методы исследований

Для изучения влияние микрокремнезема на процесс твердение облегчённых тампонажных цементов поученные на основе цемента и микрокремнезема с применением суперпластификатора использован портлпндцемент цементного завода «Кизилкумцемент», отвечающий требованиям ГОСТ10174-90. Удельной поверхности исходных материалов определяли на приборе ПСХ-4. Подготовленные стандартные образцы на основе цементной композиции с разным количеством микрокрокремнезема испытывали на прочность при изгибе и сжатии на гидравлическом прессе марки ПГМ-500МГ4А. Структурообразование и твердение цемента содержащего микрокремнезема изучали на стандартных образцах в течение 3; 7; 28 суток в затвердевших образцах. Реологические свойства и сроки схватывания растворных смесей, нормальную густоту растворных смесей и плотность изделий определяли согласно ГОСТ 10174-90 [5].

Полученные результаты и их обсуждение

Для разработки и изучение процесса гидратации и твердение облегченных тампонажных цементов было приготовлено восемь составов с разным содержанием микрокремнезема. Смеси готовились методом механической активации исходных материалов в лабораторной шаровой мельнице. В разработанных составах содержание суперпластификатора составляло 0,50 и 0,75 % от массы цемента. Разработанные составы облегченных тампонажных цементов представлены в таблице 1.

Таблица 1. Состав композиционных облегченных тампонажных цементов

Наименование компонентов	Составы облегченных тампонажных цементов, масс %							
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
Портландцемент	94,50	92,0	89,5	87,0	94,25	91,75	89,25	89,25
Микрокремнезем	5,0	7,5	10,0	12,5	5,0	7,5	10,0	12,5
Суперпластифи-катор	0,5	0,5	0,5	0,5	0,75	0,75	0,75	0,75

Процесс твердение облегчённых тампонажных растворов, содержащего тонкодисперсной активной добавки обусловлено сложными физико-химическими и химическими процессами, которые возникают из-за взаимодействия воды с клинкерными минералами, в результате чего образуются гидратные соединения, почти не подвергнутые процессу растворения.

Результаты исследование показали, что при смешивании облегченного тампонажного цемента с водой в начальные сроки схватывания растворной смесь происходит процесс загустевание растворной смеси. В процессе загустевание начинается формирование кристаллическая структура гидроалюминатов и гидроферритов кальция. В начальные сроки гидратации участвуют алюмоферриты кальция и алюминаты, из-за более высокой скорости растворения, в сравнении с другими составляющими раствора (алит и белит).

Растворные смеси приготовленное путем смешивания облегчённого тампонажного цемента с водой показали, что вначале (в течение 1 – 3 ч после затворения) цементная теста обладает хороший текучести и легко формуется.

Установлено, что в процессе схватывания растворной смесь загустевает, утрачивая подвижность, но его механическая прочность ещё невелика. Результаты исследование показали, что процесс схватывание, который заканчивается обычно через 2 – 12 ч после затворения. Переход цементной тесты в твёрдое состояние означает конец схватывания и начало твердения, которое характерно возрастанием прочности. Твердение при благоприятных условиях длится годами – вплоть до полной гидратации мономинералов цементного клинкера [6, 7]. Исследование процесса формирование структуры растворных смесей на основе облегчённых тампонажных цементов сразу после затворения композитного вяжущего водой начинаются химические реакции. Уже в начальной стадии гидратации облегченных композиционных облегченных тампонажных цементов происходит быстрое взаимодействие алита с водой, сопровождающееся образованием гидросиликата кальция и гидроксида кальция.

На основание проведенных физико-химических и физико-механических исследование процесса твердения растворных смесей на основе композиционных облегченных тампонажных цементов установлено, что низкоосновных силикатов кальция повышает прочностные характеристики цементного камня. Полученные результаты приведен в таблице [8, 9, 10]. На основание проведенных экспериментальных исследование установлено, что наличие микрокремнезема в составе композиционных облегченных тампонажных цементов увеличилась прочность при сжатии. Наилучший показатель был достигнут при добавлении 10 % марки МК-85, в результате прочность выросла на 13,0 %. С повышением содержание

микрокремнезема более 10 % прочностные характеристики цемента возросли, но при этом показатель растекаемости сильно снизился. Так, при добавлении до 10 % МК-85 цементный раствор соответствует ГОСТ 26798.1 – 96.

Таблица 2. Прочностные характеристики композиционных облегченных тампонажных цементов

№	Соотношение компонентов, масс., %			Предель прочности $R_{сж}$, МПа		
	портланд цемент	микро кремнезем	суперпласти- фикатор	3 сут.	7 сут.	28 сут.
1	94,50	5,0	0,50	18,7	26,7	39,8
2	92,0	7,5	0,50	19,8	28,4	42,0
3	89,5	10,0	0,50	23,6	32,0	47,5
4	87,0	12,5	0,50	27,3	36,7	49,3
5	94,25	5,0	0,75	30,3	38,7	50,2
6	91,75	7,5	0,75	31,2	39,5	50,4
7	89,25	10,0	0,75	32.0	40,1	51,6
8	86,25	12,5	0,75	32,2	40,1	50,9

Изучение процесса твердение композиционных облегченных тампонажных цементов показали, что в процессе образования гидратных соединений мономинералов цемента тонкодисперсные частицы микрокремнезема заполняют объем между грубодисперсными частицами гидратных соединений композиционного вяжущего, что приводит резкому сокрушению водоотделение из растворной смеси. На основание проведённых исследование установлено, что при правильной дозировке компонентов в составе облегченного тампонажного, вяжущего является не только регулятором сроков схватывания и процесса твердения облегченных композиционных тампонажных цементов. Также установлено, что кристаллизация $Ca(OH)_2$ из пересыщенного раствора цементно через 6 – 8 час перекристаллизовывается в виде длинных иглоподобных-кристаллов гидроксида кальция в растворе, и кристаллы эттрингита, которые создают начальную волокнистую структуру твердеющего цементного камня.

Заключение

На основание проведённых исследование установлено, что введение микрокрокремнезема и суперпластификатора в тампонажные смеси значительно улучшает процесс гомогенизации и их физико-химические и технологические свойства. Микрокремнезем повышает удельную поверхность вяжущих, в процессе твердение уплотняет структуру и снижает водоотделение и удлиняет сроки схватывания. Наличие суперпластификатора в состав облегченного тампонажного цемента положительной влияние на реологические свойства растворной смеси, так и на объёмный вес затвердевщего материала. Изучение процесса твердения облегчённых там понажных цементов показали, что в процессе образование гидратных соединение мономинералов цемента тонкодисперсные частиц микрокрокремнезема ускоряет процесс формирование кристаллическую структуру, что способствует повышение прочностных характеристик в начальные сроки твердения

Список литературы

1. Овчинников П.В. Специальные тампонажные композиции для цементирования газовых скважин // Известия вузов. Нефть и газ. – 2002. – № 6. – С. 14–18.
2. Мариампольский Н.А., Савенок Н.Б., Савенок О.В. Разработка облегченных цементов для работы с поглощениями тампонажного раствора // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 1997. – № 10–11.
3. Негматов С.С., Талипов Н.Х., Абед Н.С., Тулягонова В.С., Абдуллаев М.А., Пирматов Р.Х., Эшмуродов Б.Б.Умаров Ш.Ш. Исследование влияние микрокремнезём на свойства композиционных тампонажных материалов, применяющих в процессе бурения нефтегазовых скважин // Композиционные материалы. – 2024. – № 2. – С. 181–184.
4. Чистов Ю.Д., Тарасов А.С. Разработка многокомпонентных минеральных вяжущих веществ // Рос. Хим. Ж. – 2003. – № 4. – С. 12–17.
5. 5 Negmatov S.S., Abed N.S., Talibov N.X., Tulyaganova V., Abdullayev M., Raximov X. Investigation of rheological and mechanical properties of cement–microsilica composite grouting materials for soil wall stabilization in oil and gas well // Universum: Технические науки, Москва. – 2025. – № 9.
6. Величко Е.Г., Белякова Ж.С. Некоторые аспекты физикохимии и механики композитов многокомпонентных цементных систем // Строительные материалы. – 1997. – № 2. – С. 21–25.
7. Talipow N.H. DosanowaG.M., TuljaganowA.A.,ReimowA.M. Die Anwendung des porösen Füllstoffs bei der Produktion von Wärmedämmstoffen // InternationaleBaustofftagung: Tagungsband. – 2018. – P. 2–1153.
8. Эркенов М.М. Изменение состава и свойств жидкой фазы в ранние сроки гидратации портландцемента/ Изв. ВУЗов. Строительство и архитектура. -1984.-№ 12.- С. 68–71.
9. Агзамов Ф.А., Измухамбетов Б.С., Токунова Э.Ф. Химия тампонажных и промывочных растворов // Недра. М. – 2011.
10. Юдович Б.Э., Зубехин С.А., Фаликман В.Р., Башлыков Н.Ф. Цемент низкой водопотребности: новые результаты и перспективы // Цемент и его применение. – 2006. – № 4. – С. 80–84.

References

1. Ovchinnikov P.V. [Special grouting compositions for cementing gas wells]. Izvestiya vuzov. Neft’ i gaz, 2002, no. 6, P. 14–18. (In Russ.).
2. Mariampol’skii N.A., Savenok N.B., Savenok O.V. [Development of lightweight cements for operations with losses of grouting slurry]. Stroitel’stvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more, 1997, no. 10–11, P. 26. (In Russ.).
3. Negmatov S.S., Talipov N.Kh., Abed N.S., Tulyagonova V.S., Abdullaev M.A., Pirmatov R.Kh., Eshmurodov B.B., Umarov Sh.Sh. [Investigation of the effect of microsilica on the properties of composite grouting materials used in drilling oil and gas wells]. Kompozitsionnye materialy, Tashkent, 2024, no. 2, P. 181–184. (In Russ.).

4. Chistov Yu.D., Tarasov A.S. [Development of multicomponent mineral binders]. Rossiiskii Khimicheskii Zhurnal, Moscow, 2003, vol. XLVII, no. 4, P. 12–17. (In Russ.).
5. Negmatov S.S., Abed N.S., Talibov N.X., Tulyaganova V., Abdullayev M., Rakhimov X. Investigation of rheological and mechanical properties of cement–microsilica composite grouting materials for soil wall stabilization in oil and gas well. Universum: Tekhnicheskie nauki, Moscow, 2025, no. 9, P. 37–41. (In Russ.).
6. Velichko E.G., Belyakova Zh.S. [Some aspects of the physical chemistry and mechanics of composites in multicomponent cement systems]. Stroitel’nye materialy, 1997, no. 2, P. 21–25. (In Russ.).
7. Talipow N.H., Dosanowa G.M., Tuljaganow A.A., Reimow A.M. Die Anwendung des porösen Füllstoffs bei der Produktion von Wärmedämmstoffen. Internationale Baustofftagung: Tagungsband, Weimar, 2018, P. 2–1153–2–1156. (In Russ.).
8. Erkenov M.M. [Changes in the composition and properties of the liquid phase in the early stages of Portland cement hydration]. Izvestiya VUZov. Stroitel’stvo i arkhitektura, 1984, no. 12, P. 68–71. (In Russ.).
9. Agzamov F.A., Izmukhambetov B.S., Tokunova E.F. Chemistry of grouting and flushing fluids. Nedra, Moscow,. – 2011. – 245 P. (In Russ.).
10. Yudovich B.E., Zubekhin S.A., Falikman V.R., Bashlykov N.F. [Low-water-demand cement: new results and prospects]. Tsement i ego primenenie, 2006, no. 4, P. 80–84. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию: 10.10.2026
Статья принята к публикации: 17.10.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 664.3+544.77+532.135

Коллоидные и реологические свойства функционального майонеза на основе смесевых растительных масел

Чориева Иқлима Йулдош қизи
докторант, PhD
Институт общей и неорганической химии АН РУз
Республика Узбекистан, г. Узбекистан
E-mail: iqlima.choriyeva@mail.ru

Салиханова Дилноза Саидакбаровна
д-р техн. наук, проф.
Институт общей и неорганической химии АН РУз
Республика Узбекистан, г. Узбекистан
E-mail: salihanova79@mail.ru

Colloidal and rheological properties of functional mayonnaise based on blended vegetable oils

Chorieva Iklima
PhD
Institute of General and Inorganic Chemistry
Academy of Sciences of the
Republic of Uzbekistan; Republic of Uzbekistan, Uzbekistan

Salikhanova Dilnoza
doctor of Technical Sciences, Professor
Institute of General and Inorganic Chemistry
Academy of Sciences of the
Republic of Uzbekistan; Republic of Uzbekistan, Uzbekistan

Аннотация

Исследованы коллоидные и реологические свойства функциональных майонезных эмульсий, полученных с использованием смесевых растительных масел. В качестве масляной фазы применяли композиции подсолнечного, льняного и базиликового масел в соотношении 80:15:5 (К-1), а также подсолнечного, соевого и льняного масел в соотношении 60:25:15 (К-4). Массовая доля жировой фазы в готовых образцах составляла 65,3 %. Сравнивали традиционное перемешивание, ультразвуковую обработку и гомогенизацию роторно-статорного типа. Реологические показатели оценивали ротационным вискозиметром Brookfield при температуре 20±2 °C; коллоидную устойчивость характеризовали по

Библиографическое описание: Чориева И.Й.Қ., Салиханова Д.С. Коллоидные и реологические свойства функционального майонеза на основе смесевых растительных масел // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23575

показателю стабильности эмульсии и размеру капель дисперсной фазы. Установлено, что интенсивность диспергирования существенно влияет на структурно-механические характеристики майонеза. При роторно-статорной гомогенизации размер жировых капель уменьшался с 8–15 до 2–5 мкм, а устойчивость эмульсии возрастала примерно с 92–94 до 97–99 %. Динамическая вязкость образца К-1 повышалась с 5,8±0,2 до 7,4±0,3 Па·с, а К-4 — с 5,5±0,2 до 7,0±0,2 Па·с.

Полученные результаты показывают, что роторно-статорная обработка обеспечивает более выраженное улучшение дисперсности, вязкости и устойчивости исследованных эмульсий и может рассматриваться как эффективный технологический приём при разработке функционального майонеза.

Abstract

The colloidal and rheological properties of functional mayonnaise emulsions prepared with blended vegetable oils were investigated. The oil phase consisted of sunflower, flaxseed and basil oils at a ratio of 80:15:5 (K-1), and sunflower, soybean and flaxseed oils at a ratio of 60:25:15 (K-4). The fat phase content of the prepared mayonnaise samples was 65.3 %. Conventional mixing, ultrasound treatment and rotor–stator homogenization were compared. Rheological measurements were performed using a Brookfield rotational viscometer at 20±2 °C. Colloidal stability was evaluated by emulsion stability and the size of dispersed oil droplets. The results demonstrated that the intensity of dispersion significantly affected the structural and mechanical properties of mayonnaise. Rotor–stator homogenization reduced the oil droplet size from 8–15 to 2–5 μm and increased emulsion stability from approximately 92–94 % to 97–99 %. The dynamic viscosity of K-1 increased from 5.8±0.2 to 7.4±0.3 Pa·s, while that of K-4 increased from 5.5±0.2 to 7.0±0.2 Pa·s. These findings indicate that rotor–stator processing provides a more pronounced improvement in droplet dispersion, viscosity and colloidal stability than the compared treatments. The method can therefore be considered an effective technological approach for producing functional mayonnaise based on blended vegetable oils.

Ключевые слова: майонезная эмульсия, смесевые растительные масла, коллоидная устойчивость, реология, динамическая вязкость, размер жировых капель, гомогенизация.

Keywords: mayonnaise emulsion, blended vegetable oils, colloidal stability, rheology, dynamic viscosity, oil droplet size, homogenization.

Введение

Майонез представляет собой концентрированную эмульсию типа «масло в воде», свойства которой определяются соотношением фаз, природой и концентрацией эмульгатора, размером капель дисперсной фазы и взаимодействиями между структурными элементами. Коллоидная устойчивость продукта имеет принципиальное значение для предотвращения коалесценции, расслоения и изменения консистенции при хранении. Физическая стабильность майонеза связана как с составом рецептуры, так и с условиями механической обработки эмульсии [2; 5; 7].

Реологические характеристики — прежде всего динамическая вязкость и особенности течения — определяют консистенцию, намазываемость и технологическое поведение продукта при перекачивании, фасовании и хранении. Для майонезных систем вязкость зависит от объёмной доли масла, распределения капель по размерам, состава межфазного слоя и взаимодействия между каплями. Поэтому изменение масляной фазы и выбор режима гомогенизации требуют совместной оценки реологических и коллоидных параметров [1; 3; 6].

Одним из подходов к созданию функциональных майонезов является применение композиций растительных масел с различным жирнокислотным составом. Однако изменение масляной фазы может влиять не только на пищевую ценность, но и на формирование эмульсионной структуры. В связи с этим необходимо оценивать, как технологические способы диспергирования отражаются на размере капель, устойчивости и вязкости майонеза.

Цель исследования — установить влияние традиционного перемешивания, ультразвуковой обработки и роторно-статорной гомогенизации на коллоидную устойчивость и реологические свойства функционального майонеза, полученного на основе смесевых растительных масел.

Материалы и методы

Объектами исследования являлись майонезные эмульсии, приготовленные на основе двух смесевых масляных композиций. Композиция К-1 включала подсолнечное, льняное и базиликовое масла в соотношении 80:15:5; композиция К-4 — подсолнечное, соевое и льняное масла в соотношении 60:25:15. Массовая доля жировой фазы в исследуемых образцах составляла 65,3 %. Эмульсии готовили по классической технологии: формировали водную фазу, вводили эмульгирующий компонент, постепенно добавляли масляную фазу, после чего проводили перемешивание и гомогенизацию.

Для сопоставления технологических режимов использовали традиционное перемешивание, ультразвуковую обработку и роторно-статорную гомогенизацию. В исследовании роторно-статорную обработку проводили при скорости ротора 8000–12000 об/мин.; в качестве оптимального диапазона в диссертационной работе указан интервал 10000–12000 об/мин. Сравнение проводили по показателям вязкости, устойчивости эмульсии и размера жировых капель.

Динамическую вязкость измеряли ротационным вискозиметром типа Brookfield при температуре 20±2 °С. Коллоидную устойчивость оценивали по процентному показателю стабильности эмульсии, а дисперсность — по размеру жировых капель. Представленные значения приведены в соответствии с экспериментальными данными, проделанными авторами данной статьи. Все параметры измерительного протокола зафиксированы в лабораторном журнале Института общей и неорганической химии АН РУз.

Результаты и обсуждение

В обеих исследуемых рецептурах переход от традиционного перемешивания к более интенсивной обработке сопровождался увеличением динамической вязкости. Для образца К-1 вязкость при традиционном перемешивании составляла 5,8±0,2 Па·с, после

ультразвуковой обработки — 6,7±0,2 Па·с, а после роторно-статорной гомогенизации — 7,4±0,3 Па·с. Для образца К-4 соответствующие значения составляли 5,5±0,2; 6,3±0,2 и 7,0±0,2 Па·с (табл. 1).

Таблица 1. Динамическая вязкость функционального майонеза при различных способах обработки

Образец	Способ обработки	Динамическая вязкость, Па·с
К-1	Традиционное перемешивание	5,8 ± 0,2
К-1	Ультразвуковая обработка	6,7 ± 0,2
К-1	Роторно-статорная гомогенизация	7,4 ± 0,3
К-4	Традиционное перемешивание	5,5 ± 0,2
К-4	Ультразвуковая обработка	6,3 ± 0,2
К-4	Роторно-статорная гомогенизация	7,0 ± 0,2

По отношению к традиционному перемешиванию вязкость К-1 после ультразвуковой обработки возрастала приблизительно на 15,5 %, а после роторно-статорной гомогенизации — на 27,6 %. Для К-4 увеличение составляло около 14,5 и 27,3 % соответственно. Таким образом, при обоих составах масляной фазы наиболее выраженное изменение реологических характеристик наблюдалось при использовании роторно-статорного аппарата.

Увеличение вязкости может быть связано с уменьшением размера жировых капель и ростом суммарной межфазной поверхности. При более тонком диспергировании возрастает площадь контакта масла с водной фазой, а эмульгирующие компоненты формируют межфазный слой на большей поверхности капель. В концентрированных эмульсиях это способствует усилению взаимодействия дисперсных элементов и формированию более выраженной внутренней структуры. Аналогичная зависимость между параметрами гомогенизации, размером капель и реологией майонезоподобных эмульсий отмечается в литературе [3; 4; 6].

Коллоидная устойчивость также зависела от способа обработки. При традиционном перемешивании устойчивость образца К-1 составляла 94,2±0,4 %, а К-4 — 93,8±0,5 %. После ультразвуковой обработки значения повышались до 96,8±0,3 и 96,2±0,4 % соответственно. Максимальные значения зафиксированы после роторно-статорной гомогенизации: 98,1±0,2 % для К-1 и 97,6±0,3 % для К-4 (табл. 2).

Таблица 2. Коллоидная устойчивость майонезных эмульсий при различных способах обработки

Образец	Способ обработки	Устойчивость эмульсии, %
К-1	Традиционное перемешивание	94,2 ± 0,4
К-1	Ультразвуковая обработка	96,8 ± 0,3
К-1	Роторно-статорная гомогенизация	98,1 ± 0,2
К-4	Традиционное перемешивание	93,8 ± 0,5
К-4	Ультразвуковая обработка	96,2 ± 0,4
К-4	Роторно-статорная гомогенизация	97,6 ± 0,3

Данные показывают, что по сравнению с традиционным перемешиванием роторно-статорная обработка повышала устойчивость на 3,9 процентного пункта для К-1 и на 3,8 процентного пункта для К-4. Ультразвуковая обработка также улучшала показатель, однако уступала роторно-статорной гомогенизации. Полученные значения соответствуют общему представлению о том, что уменьшение размера капель снижает вероятность их быстрого разделения под действием гравитации и способствует более равномерному распределению дисперсной фазы [2; 5; 7].

По данным исследования, размер жировых капель после гомогенизации уменьшался с 8–15 до 2–5 мкм. Такое измельчение дисперсной фазы согласуется с повышением вязкости и устойчивости, наблюдаемым в обоих образцах. При этом К-1 демонстрировал несколько более высокие значения вязкости и устойчивости, чем К-4, независимо от использованного способа обработки. Различия между рецептурами могут быть обусловлены составом масляной фазы и особенностями формирования межфазного слоя, однако для установления конкретного механизма потребуются дополнительные измерения межфазных характеристик и микроструктуры.

Результаты подтверждают, что свойства функционального майонеза определяются совместным действием рецептурного состава и технологического режима. Поэтому при масштабировании процесса следует контролировать не только скорость вращения ротора, но и продолжительность обработки, температуру продукта и воспроизводимость измерений. Указанный в данной работе диапазон 10000–12000 об/мин. может рассматриваться как перспективный режим для изученных композиций; его промышленное применение требует дополнительной проверки с учётом геометрии аппарата и объёма партии.

Заключение

1. Установлено, что способ гомогенизации оказывает существенное влияние на коллоидную устойчивость и реологические характеристики функционального майонеза, приготовленного на основе смесевых растительных масел.

2. Роторно-статорная гомогенизация обеспечивала наибольшую динамическую вязкость: 7,4±0,3 Па·с для К-1 и 7,0±0,2 Па·с для К-4. По сравнению с традиционным перемешиванием вязкость увеличивалась приблизительно на 27 % для обеих композиций.

3. После роторно-статорной обработки размер жировых капель снижался с 8–15 до 2–5 мкм, а устойчивость эмульсий достигала 98,1±0,2 % для К-1 и 97,6±0,3 % для К-4. Ультразвуковая обработка занимала промежуточное положение по исследованным показателям.

4. В пределах изученных условий роторно-статорная гомогенизация является наиболее эффективным из сравниваемых способов для формирования более тонкодисперсной и устойчивой майонезной эмульсии. Перед внедрением режима в промышленную практику целесообразно подтвердить воспроизводимость результатов и уточнить параметры измерения вязкости и дисперсности.

Список литературы

1. Abu Ghoush M., Samhouri M., Al-Holy M., Herald T. Formulation and fuzzy modeling of emulsion stability and viscosity of a gum–protein emulsifier in a model mayonnaise system // Journal of Food Engineering. – 2008. – T. 84. – P. 348–357. – DOI: 10.1016/j.jfoodeng. 2007.05.025.
2. Alvarez-Sabatel S. Martínez de Marañón I., Arboleya J.-C. Impact of oil and inulin content on the stability and rheological properties of mayonnaise-like emulsions processed by rotor-stator homogenisation or high-pressure homogenisation // Innovative Food Science & Emerging Technologies. – 2018. – T. 48. – P. 195–203. – DOI: 10.1016/j.ifset.2018.06.014.
3. Chivero P., Gohtani S., Yoshii H., Nakamura A. Assessment of soy soluble polysaccharide, gum arabic and OSA-starch as emulsifiers for mayonnaise-like emulsions // LWT – Food Science and Technology. – 2016. – T. 69. – P. 59–66. – DOI: 10.1016/j.lwt.2015.12.064.
4. Depree J.A., Savage G.P. Physical and flavour stability of mayonnaise // Trends in Food Science & Technology. – 2001. – T. 12. – P. 157–163. – DOI: 10.1016/S0924-2244(01)00079-6.
5. Dickinson E. Hydrocolloids at interfaces and the influence on the properties of dispersed systems // Food Hydrocolloids. – 2003. – № 1. – P. 25–39. – DOI: 10.1016/ S0268-005X(01)00120-5.
6. Franco J.M., Berjano M., Guerrero A., Muñoz J., Gallegos C. Flow behaviour and stability of light mayonnaise containing a mixture of egg yolk and sucrose stearate as emulsifiers // Food Hydrocolloids. – 1995. – T. 9, № 2. – P. 111–121. – DOI: 10.1016/S0268-005X(09)80273-7.
7. Kantekin-Erdogan M.N., Ketenoglu O., Tekin A. Effect of monoglyceride content on emulsion stability and rheology of mayonnaise // Journal of Food Science and Technology. – 2019. – T. 56. – P. 443–450. – DOI: 10.1007/s13197-018-3506-2.
8. Ma L., Barbosa-Cánovas G.V. Rheological characterization of mayonnaise. Part II: Flow and viscoelastic properties at different oil and xanthan gum concentrations // Journal of Food Engineering. – 1995. – T. 25, № 3. – P. 409–425. – DOI: 10.1016/0260–8774(94)00010-7.
9. McClements D.J. Food Emulsions: Principles, Practices, and Techniques. – 3rd ed. – Boca Raton: CRC Press, 2015. – 714 P.
10. Ozcan I., Ozyigit E., Erkoc S., Tavman S., Kumcuoglu S. Investigating the physical and quality characteristics and rheology of mayonnaise containing aquafaba as an egg substitute // Journal of Food Engineering. – 2023. – T. 344. – Art. 111388. – DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2022.111388.

References

1. McClements D.J. McClements D.J. Food Emulsions: Principles, Practices, and Techniques. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press;. – Boca Raton: CRC Press, 2015. – 714 P.
2. Abu Ghoush M., Samhouri M., Al-Holy M., Herald T. Formulation and fuzzy modeling of emulsion stability and viscosity of a gum-protein emulsifier in a model mayonnaise system // Journal of Food Engineering. – 2008. – DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2007.05.025.

3. Alvarez-Sabatel S., Martínez de Marañón I., Arboleya J.-C. Impact of oil and inulin content on the stability and rheological properties of mayonnaise-like emulsions processed by rotor-stator homogenisation or high-pressure homogenisation. Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2018;48:195–203. DOI: 10.1016/j.ifset.2018.06.014.
4. Chivero P., Gohtani S., Yoshii H., Nakamura A. Assessment of soy soluble polysaccharide, gum arabic and OSA-starch as emulsifiers for mayonnaise-like emulsions. LWT – Food Science and Technology. 2016;69:59–66. DOI: 10.1016/j.lwt.2015.12.064.
5. Depree J.A., Savage G.P. Physical and flavour stability of mayonnaise. Trends in Food Science & Technology. 2001;12:157–163. DOI: 10.1016/S0924-2244(01)00079-6.
6. Dickinson E. Hydrocolloids at interfaces and the influence on the properties of dispersed systems. Food Hydrocolloids. 2003;17(1):25–39. DOI: 10.1016/S0268-005X(01)00120-5.
7. Franco J.M., Berjano M., Guerrero A., Muñoz J., Gallegos C. Flow behaviour and stability of light mayonnaise containing a mixture of egg yolk and sucrose stearate as emulsifiers. Food Hydrocolloids. 1995;9(2):111–121. DOI: 10.1016/S0268-005X(09)80273-7.
8. Kantekin-Erdogan M.N., Ketenoglu O., Tekin A. Effect of monoglyceride content on emulsion stability and rheology of mayonnaise // Journal of Food Science and Technology. – 2019. – DOI: 10.1007/s13197-018-3506-2.
9. Ma L., Barbosa-Cánovas G.V. Rheological characterization of mayonnaise. Part II: Flow and viscoelastic properties at different oil and xanthan gum concentrations // Journal of Food Engineering. – 1995. – DOI: 10.1016/0260–8774(94)00010-7.
10. Ozcan I., Ozyigit E., Erkoc S., Tavman S., Kumcuoglu S. Investigating the physical and quality characteristics and rheology of mayonnaise containing aquafaba as an egg substitute // Journal of Food Engineering. – 2023. – DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2022.111388.

Статья поступила в редакцию: 24.09.2026
Статья принята к публикации: 30.09.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 628.54:669

DOI: 10.32743/UniTech.2026.151.10.23489

Кислые стоки гидрометаллургических производств: образование, химизм и нейтрализация

Шарипов Санъат Шухрат угли
д-р. техн. наук, доц.
кафедры Химическая технология, Навоийский государственный горно-технологический университет
Республика Узбекистан, г. Навои
E-mail: element_2993@mail.ru

Юлдошева Муниса Баходир кизи
базовый докторант
Навоийский государственный горно-технологический университет
Республика Узбекистан, г. Навои

Азимова Дилафруз Бурхон кизи
ученик-стажёр, Навоийский государственный горно-технологический университет
Республика Узбекистан, г. Навои

Acidic wastewater of hydrometallurgical production: formation, chemistry and neutralization

Sharipov Sanat
Head of the Department of Chemical Technology, PhD
Associate Professor, Navoi State University of Mining and Technologies
Republic of Uzbekistan, Navoi

Yuldosheva Munisa Bakhodir kizi
Basic doctoral student
Navoi State University of Mining and Technologies
Republic of Uzbekistan, Navoi

Azimova Dilafruz Burkhon kizi
Research Intern, Navoi State University of Mining and Technologies
Republic of Uzbekistan, Navoi

Аннотация

В статье рассматриваются вопросы образования, химического состава и нейтрализации кислых сточных вод, образующихся в процессе бактериального окисления сульфидных золотосодержащих концентратов. Объектом исследования являлся верхний перелив

Библиографическое описание: Шарипов С.Ш.У., Юлдошева М.Б. кизи, Азимова Д.Б. кизи Кислые стоки гидрометаллургических производств: образование, химизм и нейтрализация // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23489

противоточного декантатора ПТД-1 участка бактериального окисления Гидрометаллургического завода №3. Исследуемый раствор характеризовался высокой кислотностью (pH 1,2) и плотностью 1,032 г/см³. Масс-спектрометрический анализ показал многокомпонентный химический состав раствора, включающий железо, медь, мышьяк, никель, кобальт, марганец, магний, кальций, калий, натрий, свинец, сурьму, серебро и другие элементы. Среди определяемых металлических компонентов наибольшая концентрация наблюдалась для железа и составляла 13,7 г/л. Концентрация сульфатов достигала 43,0 г/л, мышьяка — 1,87 г/л, меди — 327,4 мг/л.

Проведена экспериментальная нейтрализация кислого стока с использованием $CaCO_3$, CaO и NaOH. Установлено повышение pH исходного раствора до 6,20; 7,40 и 6,46 соответственно. Рентгенофазовый анализ образующегося твёрдого материала подтвердил наличие гипса ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) и других минеральных фаз. Полученные результаты показывают необходимость учитывать при выборе нейтрализующего реагента не только достигаемое значение pH, но и фазовый состав образующегося осадка.

Abstract

The paper considers the formation, chemical composition and neutralization of acidic wastewater generated during the bacterial oxidation of sulfide gold-bearing concentrates. The upper overflow of the counter-current decantation unit PTD-1 of the bacterial oxidation section of Hydrometallurgical Plant No. 3 was used as the research object. The studied solution was characterized by high acidity (pH 1.2) and a density of 1.032 g/cm³. Mass spectrometric analysis revealed a multicomponent composition containing iron, copper, arsenic, nickel, cobalt, manganese, magnesium, calcium, potassium, sodium, lead, antimony, silver and other elements. The highest concentration among the determined metallic components was observed for iron and amounted to 13.7 g/L. The sulfate concentration reached 43.0 g/L, arsenic 1.87 g/L and copper 327.4 mg/L. Experimental neutralization was performed using $CaCO_3$, CaO and NaOH; the final pH values reached 6.20, 7.40 and 6.46, respectively. X-ray phase analysis of the solid material confirmed the presence of gypsum ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) and other mineral phases. The results indicate that selection of a neutralizing reagent should consider both the achieved pH and the phase composition of the resulting precipitate.

Ключевые слова: кислые стоки, бактериальное окисление, гидрометаллургия, сульфидные концентраты, нейтрализация, мышьяк, сульфаты.

Keywords: acidic wastewater, bacterial oxidation, hydrometallurgy, sulfide concentrates, neutralization, arsenic, sulfates.

Введение

Современное развитие гидрометаллургических технологий переработки минерального сырья сопровождается увеличением объёмов технологических растворов и сточных вод, содержащих широкий спектр растворённых неорганических компонентов. Особую группу представляют кислые растворы, образующиеся при переработке сульфидного сырья, в том числе при бактериальном окислении упорных золотосодержащих концентратов[5,10].

Актуальность переработки таких растворов обусловлена одновременно экологическими и технологическими факторами. С одной стороны, кислые стоки характеризуются низкими значениями pH и содержат растворённые соединения железа, меди, цинка, никеля, мышьяка, сурьмы и других элементов. При попадании таких растворов в окружающую среду они могут оказывать отрицательное воздействие на почву и водные объекты. С другой стороны, высокая концентрация отдельных компонентов позволяет рассматривать кислые стоки как техногенное вторичное сырьё, пригодное для получения полезных продуктов.

Одним из перспективных процессов предварительной переработки упорного золотосодержащего сульфидного сырья является бактериальное окисление. В процессе жизнедеятельности ацидофильных микроорганизмов происходит окисление сульфидных минералов, в результате чего разрушается минеральная матрица, в которой заключены ценные компоненты. Бактериальное окисление сопровождается формированием кислой сульфатной жидкой фазы, состав которой необходимо учитывать при выборе последующей стадии нейтрализации [1, 7,11].

При окислении сульфидных минералов часть железа и других элементов переходит в жидкую фазу. Одновременно формируется сульфатная среда и поддерживается высокая кислотность раствора. Состав образующегося раствора зависит от минерального состава исходного концентрата, степени его окисления, продолжительности процесса, кислотности среды и активности микроорганизмов [2, 3, 6].

Ключевой операцией при переработке кислых стоков является нейтрализация, позволяющая снизить кислотность раствора и подготовить воду к дальнейшему технологическому использованию. При выборе реагента необходимо учитывать его расход, достигаемое значение pH и влияние на состав образующихся твёрдых фаз [4, 8, 9].

Целью исследования является изучение химического состава кислого стока, образующегося при бактериальном окислении сульфидных золотосодержащих концентратов, определение основных компонентов, представляющих технологический и экологический интерес, и обоснование направлений его нейтрализации.

Материалы и методы

Объектом исследования являлся кислый технологический раствор – верхний слив противоточного декантатора ПТД-1, образующийся в цехе бактериального окисления Гидрометаллургического завода №3. Исходный раствор имел pH = 1,2 и плотность ρ = 1,032 г/см³. Объём раствора, использованный в опыте по нейтрализации, составлял 1,0 л. Элементный состав раствора определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) на приборе ИС-ICP-MS-7500. Массовую концентрацию хлорид-, нитрат- и сульфат-ионов в технологическом растворе определяли титриметрическими методами.

Определение хлорид-ионов. Метод измерений – титриметрический, основан на количественном взаимодействии хлорид-ионов, с ионами серебра, содержащимися в добавленном к анализируемой пробе, точно отмеренном и взятом в избытке объеме нитрата серебра, с образованием осадка хлорида серебра

$Ag^+ + Cl^- \rightarrow AgCl\downarrow$

Избыток ионов серебра оттитровывают в азотнокислой среде раствором аммония роданистого или калия роданистого

$AgNO_3 + NH_4SCN \rightarrow AgSCN\downarrow + NH_4NO_3$

Точку эквивалентности определяют в присутствии железоаммонийных квасцов, применяемых в качестве индикатора. После полного связывания ионов серебра появляется неисчезающее красновато-коричневое окрашивание анализируемого раствора, обусловленное образованием роданида железа

$6NH_4SCN + Fe_2(SO_4)_3 \rightarrow 2Fe(SCN)_3 + 3(NH_4)_2SO_4$

По разности израсходованных объемов роданида аммония, пошедшего на титрование точно отмеренного объема нитрата серебра (V_x) и на титрование избытка нитрата серебра (V), оставшегося после взаимодействия с хлорид-ионами анализируемой пробы – определяют объем роданида аммония эквивалентный объему нитрата серебра, израсходованного на реакцию осаждения хлорид-ионов (V_x - V).

Определение нитрат ионов. Метод основан на реакции восстановления в сернокислой среде нитрат-ионов ионами железа (II), содержащимися в точно отмеренном объеме раствора соли Мора, взятом с избытком

$6FeSO_4 + 2HNO_3 + 3H_2SO_4 \rightarrow 3Fe_2(SO_4)_3 + 2NO + 4H_2O$

Избыток ионов железа (II) окисляется ионами хрома (VI) в процессе титрования раствором дихромата калия в присутствии индикатора дифениламиносульфоната натрия.

Определение сульфат ионов. Выполнение измерений массовой концентрации сульфатов титриметрическим методом основано на образовании труднорастворимого сульфата бария при прибавлении раствора хлорида бария к анализируемому раствору. После практически полного осаждения сульфатов избыток ионов бария реагирует с индикатором с образованием комплексного соединения. При этом окраска раствора изменяется от сине-фиолетовой (фиолетовой) до голубой. Для уменьшения растворимости осадка сульфата бария титрование проводят в водно-спиртовой или водно-ацетоновой среде.

Первоначально образующиеся частицы сульфата бария слишком малы, чтобы их можно было фильтровать и промывать. Поэтому важным этапом является созревание осадка, в процессе которого формируются более крупные кристаллы:

$Ba^{2+}_{(р\text{-}р)} + SO_4^{2-}{}_{(р\text{-}р)} \rightarrow BaSO_{4(тв.)}$

Сульфат бария осаждают из кислого раствора, что повышает избирательность осаждения. Однако если кислотность раствора слишком велика, часть осадка сульфата бария растворяется. Для того чтобы осаждение считалось количественным, потеря массы сульфата бария за счет растворимости не должна превышать величину абсолютной погрешности взвешивания используемых аналитических весов. Для уменьшения растворимости осадка вводят небольшой избыток осадителя (хлорида бария).

Тонкий кристаллический осадок сульфата бария обычно фильтруют через плотный беззольный бумажный фильтр и промывают несколько раз декантацией. Этот осадок не пептизируется, поэтому его можно промывать чистой водой. Чтобы потери в массе сульфата бария за счет растворимости при промывании были незначимы, следует избегать слишком долгого промывания осадка и прибавления больших объемов промывной жидкости. Для

окончательного удаления следов примесей с поверхности осадка, находящегося на фильтре, сульфат бария несколько раз промывают на фильтре до отрицательной реакции на присутствие хлорид-ионов в промывных водах.

Для нейтрализации исследовали карбонат кальция ($CaCO_3$), оксид кальция (CaO) и гидроксид натрия (NaOH): реагенты вводили постепенно при перемешивании с периодическим контролем pH. Образовавшийся твёрдый материал исследовали методом рентгенофазового анализа. Рентгенофазовый анализ проводился на порошковых рентгеновских диффрактометерах «Panalytical Empyrean» и «Shimadzu XRD-6100». Порошки образца тщательно мешались для получения образца со средним содержанием. Полуколичественный рентгенофазный анализ методом Риетвелда производился на программном обеспечении “Profex – Open source XRD and Reitveld Refinement”

Результаты и обсуждение

Образование кислого стока связано с окислением сульфидных минералов и переходом продуктов их разрушения в жидкую фазу. Для пирита процесс условно может быть представлен следующей последовательностью реакций:

$2FeS_2 + 7O_2 + 2H_2O \rightarrow 2FeSO_4 + 2H_2SO_4$

$4Fe^{2+} + O_2 + 4H^+ \rightarrow 4Fe^{3+} + 2H_2O$

В процессе биоокисления формируется сложная многокомпонентная жидкая фаза, содержащая сульфат-ионы и растворённые соединения различных элементов. Её состав определяется минеральным составом исходного сырья, степенью окисления сульфидов, продолжительностью процесса и условиями бактериального окисления.

Химический состав исследуемого стока. Результаты анализа образца представлены в таблице 1.

Таблица 1. Элементный состав кислого стока верхнего слива ПТД-1

Компонент	Содержание, мг/л	Содержание, г/л
Ag	<0,005	<0,000005
Al	159	0,159
As	1870	1,870
B	3,51	0,00351
Ba	1,73	0,00173
Be	0,0253	0,0000253
Ca	226	0,226
Cd	0,136	0,000136
Co	0,045	0,000045
Cr	0,956	0,000956
Cu	327,4	0,3274
Fe	13700	13,700
K	185	0,185
Li	0,401	0,000401
Mg	702	0,702
Mn	35,4	0,0354

Компонент	Содержание, мг/л	Содержание, г/л
Mo	0,361	0,000361
Na	546	0,546
Ni	24,8	0,0248
P	52,2	0,0522

Из таблицы 1 видно, что исследуемый раствор содержит значительные количества растворённых компонентов, среди которых экологически значимым является мышьяк. Его концентрация составляет 1870 мг/л, или 1,87 г/л. Высокое содержание сульфат-ионов и низкое значение pH определяют необходимость проведения нейтрализации перед возвратом воды в технологический цикл.

Существенное экологическое значение имеет содержание мышьяка - 1870 мг/л, или 1,87 г/л. Следовательно, в 1 м³ исследуемого раствора потенциально содержится около 1,87 кг мышьяка. Поэтому при разработке технологической схемы необходимо обеспечить его контролируемое удаление и исключить перенос мышьяка в конечную оборотную воду.

Значительные концентрации также характерны для магния (702 мг/л), натрия (546 мг/л), меди (327,4 мг/л), кальция (226 мг/л), калия (185 мг/л) и никеля (24,8 мг/л). Наличие одновременно основных, цветных и токсичных компонентов подтверждает необходимость последовательного разделения раствора, а не его прямой нейтрализации. Для образца установлены следующие показатели:

Таблица 2. Основные физико-химические показатели кислого стока

Показатель	Значение
pH	1,20
Плотность, г/см³	1,032
Cl^-, мг/л	1773
SO_4^{2-}, мг/л	43002
SO_4^{2-}, г/л	43,002
NO_3^-, мг/л	28

Содержание сульфат-ионов достигает 43,002 г/л. В пересчёте на 1 м³ раствора это около 43,0 кг сульфат-ионов. Высокая концентрация сульфатов является закономерным следствием окисления сульфидной составляющей исходного сырья. При этом pH = 1,2 характеризует раствор как сильно кислый. Следует различать показатель pH и массовую концентрацию свободной серной кислоты: для определения последней необходим отдельный титриметрический анализ.

Плотность раствора 1,032 г/см³ также характеризует значительное содержание растворённых компонентов. В совокупности pH, плотность и ионный состав подтверждают, что верхний слив ПТД-1 представляет собой концентрированный кислый технологический раствор, химический состав которого может изменяться в зависимости от условий процесса бактериального окисления и противоточной декантации.

Нейтрализация является основной стадией переработки кислых стоков, образующихся в процессе бактериального окисления сульфидного сырья. Эффективность данной стадии определяется способностью нейтрализующего реагента снижать кислотность раствора до заданного значения pH, а также влиянием реагента на состав образующихся твёрдых фаз. При этом необходимо учитывать высокое содержание сульфат-ионов в кислых стоках, вследствие чего применение кальцийсодержащих реагентов может сопровождаться образованием малорастворимых сульфатных соединений.

Таблица 3. Нейтрализация кислого стока

Реганет	**расход**	**pH**	**расход**	**pH**	**расход**	**pH**	**расход**	**pH**	**Общий расход**
$CaCO_3$	20,0	**2,42**	10,0	**2,66**	10,0	**3,15**	10,0	**6,20**	50г
CaO	20,0	**2,48**	5,0	**2,68**	10,0	**5,67**	0,0	**7,40**	35г
NaOH	13,0	**2,65**	5,0	**2,96**	5,0	**3,22**	5,0	**6,46**	28г

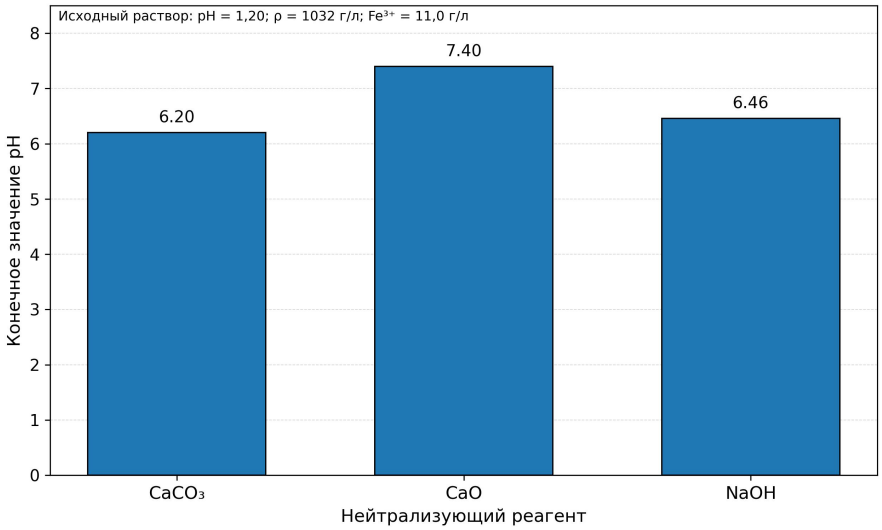


Рисунок 1. Влияние вида нейтрализующего реагента на конечное значение pH кислого стока ПТД-1

Полученные результаты показывают (табл. 3), что нейтрализация должна рассматриваться не только как операция повышения pH, но и как процесс, влияющий на фазовый состав образующегося твёрдого материала. Поэтому при выборе реагента необходимо учитывать достигаемое значение pH, его расход и характер формирующихся фаз.

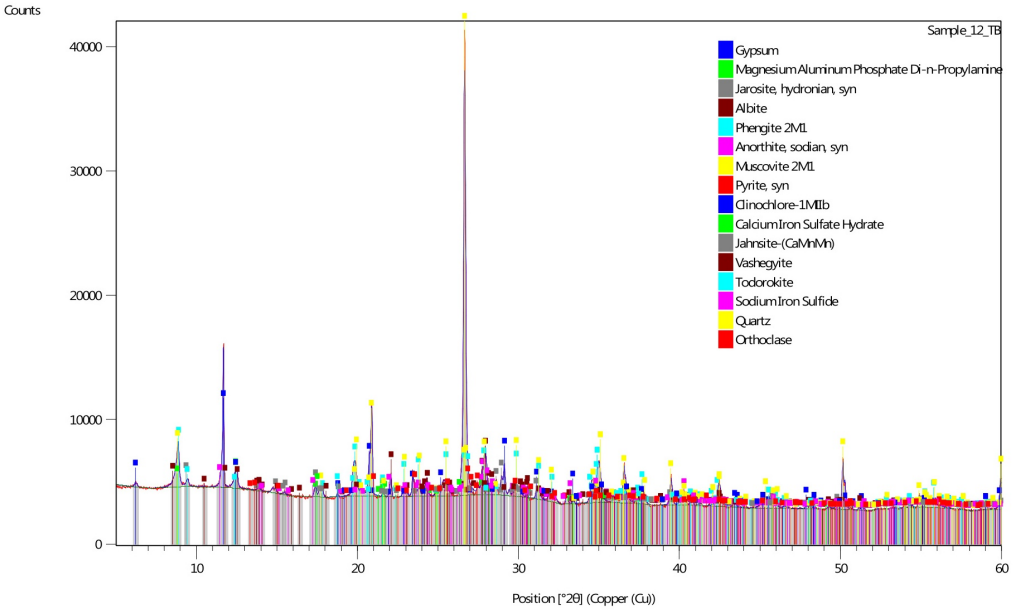


Рисунок 2. Рентгенограмма осадка после обработки кислого стока ПТД-1

Полученный твёрдый материал при нейтрализации кальцийсодержащим реагентом (CaO) был исследован методом рентгенофазового анализа. Согласно рентгенограммы (рис.2), в составе образца идентифицирован гипс ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), а также кварц, альбит, анортит, ортоклаз, мусковит, фенгит и другие минеральные фазы. Наличие гипса подтверждает возможность образования кальцийсодержащих сульфатных соединений при обработке кислого раствора.

Таким образом, при нейтрализации кальцийсодержащими реагентами происходит не только снижение кислотности, но и изменение фазового состава твёрдой фазы вследствие связывания сульфат-ионов.

$CaO + H_2SO_4 \rightarrow CaSO_4\downarrow + H_2O$

$CaCO_3 + H_2SO_4 \rightarrow CaSO_4\downarrow + CO_2\uparrow + H_2O$

Установлено, что применение всех исследованных реагентов обеспечивало существенное повышение pH исходного кислого раствора. При использовании $CaCO_3$ конечное значение pH достигало 6,20, для CaO - 7,40, а при применении NaOH - 6,46. Наиболее высокое конечное значение pH получено при использовании CaO.

Результаты рентгенофазового анализа подтверждают, что нейтрализация кислого стока представляет собой не только процесс повышения pH, но и сложный физико-химический процесс формирования твёрдой фазы. Полученные данные необходимо учитывать при разработке технологии нейтрализации и последующего обращения с образующимся осадком.

Наличие гипса имеет принципиальное значение при рассмотрении процесса нейтрализации кислых сульфатных стоков с применением кальцийсодержащих реагентов. При введении $CaCO_3$ или CaO в раствор создаются условия для связывания сульфат-ионов кальцием и формирования сульфата кальция; в зависимости от условий кристаллизации он может присутствовать в гидратированной форме - гипса. Поэтому образование гипса следует учитывать при оценке фазового состава осадка и при выборе нейтрализующего реагента.

Заключение

Исследование показало, что верхний слив ПТД-1 цеха бактериального окисления ГМЗ-3 представляет собой многокомпонентный кислый технологический раствор. Значение pH составляет 1,2, плотность – 1,032 г/см³, а содержание сульфат-ионов достигает 43,002 г/л.

Экспериментальная нейтрализация с использованием $CaCO_3$, CaO и NaOH показала возможность повышения pH кислого стока до 6,20; 7,40 и 6,46 соответственно. Наиболее высокое конечное значение pH получено при применении CaO.

Рентгенофазовый анализ твёрдого материала подтвердил наличие гипса ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), что указывает на образование кальцийсодержащих сульфатных фаз при нейтрализации кислого раствора. Следовательно, выбор нейтрализующего реагента должен учитывать не только достижение требуемого pH, но и влияние процесса на фазовый состав образующегося материала и качество обработанной воды.

Список литературы

1. Лобанов Д.З., Верникова Л.М. Микробиологическое выщелачивание металлов: учебное пособие. – М.: МГРИ, 2006. – 192 с.
2. Санакулов К.С., Мухиддинов Б.Ф., Шарипов С.Ш., Умразаков А.Т. Исследование изменения концентрации ионов металлов в бактериальном окислении флотоконцентрата в жидкой фазе // Горный вестник Узбекистана. – 2020. – № 4. – С. 24–28.
3. Санакулов У.К., Тажибаев Д.Ю. Способ переработки кислых сбросных растворов процесса биоокисления сульфидных флотоконцентратов: патент FAP 03129. – 2018.
4. Шарипов С.Ш., Мухиддинов Б.Ф. Бактериальное выщелачивание сульфидных флотоконцентратов // Universum: технические науки. – 2020. – № 12. – С. 97–100.
5. Andrianandraina S.H., Darvishi-Alamdari H., Blais J.-F. Reuse of Acid Bioleachate in Bacterial Oxidation of a Refractory Gold Sulfide Concentrate // Minerals. – 2022. – T. 12, № 9. – Art. 1087. – DOI: 10.3390/min12091087.
6. Hernández P., Recio G., Schwarz A. et al. Arsenic (III) and arsenic (V) removal from acidic mine waters using an acidophilic sulfate-reducing bioreactor // Hydrometallurgy. – 2023. – T. 221. – Art. 106137. – DOI: 10.1016/j.hydromet.2023.106137.
7. Kara I.T., Kremser K., Wagl, S.T. et al. Bioleaching metal-bearing wastes and by-products for resource recovery: a review // Environmental Chemistry Letters. – 2023. – T. 21. – P. 3329–3350. – DOI: 10.1007/s10311-023-01611-4.
8. Maltrana V., Morales J. The Use of Acid Leaching to Recover Metals from Tailings: A Review // Metals. – 2023. – T. 13, № 11. – Art. 1862. – DOI: 10.3390/met13111862.
9. Xu L., Zheng Y., Zhao Y., Chen W. Recovery of arsenic oxide, harmless gypsum residue and clean water by lime neutralization and precipitation // Hydrometallurgy. – 2023. – T. 215. – Art. 105996. – DOI: 10.1016/j.hydromet.2022.105996.
10. Kefeni K.K., Msagati T.A.M., Mamba B.B. Acid mine drainage: Prevention, treatment options, and resource recovery: A review // Journal of Cleaner Production. – 2017. – T. 151. – P. 475–493. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.03.082.

11. Skousen J., Zipper C.E., Rose A., Ziemkiewicz P.F., Nairn R. McDonald L.M., Kleinmann R.L. Review of Passive Systems for Acid Mine Drainage Treatment // Mine Water and the Environment. – 2017. – T. 36. – P. 133–153. – DOI: 10.1007/s10230-016-0417-1.

References

1. Lobanov D.Z., Vernikova L.M. [Microbiological Leaching of Metals: A Study Guide. Moscow: MGRI, 2006. 192 P.] (In Russ.).
2. Sanakulov K.S., Mukhiddinov B.F., Sharipov S.Sh., Umrazakov A.T. [Investigation of Changes in Metal Ion Concentration in Bacterial Oxidation of Flotation Concentrate in the Liquid Phase] // Gornyj vestnik Uzbekistana. – 2020. – No. 4. (In Russ.).
3. Sanakulov U.K., Tazhibaev D.Yu. [Method for Processing Acidic Waste Solutions from Biooxidation of Sulfide Flotation Concentrates: Patent FAP 03129]. – 2018. (In Russ.).
4. Sharipov S.Sh., Mukhiddinov B.F. [Bacterial Leaching of Sulfide Flotation Concentrates] // Universum: tekhnicheskie nauki. – 2020. – No. 12. (In Russ.).
5. Andrianandraina S.H., Darvishi-Alamdari H., Blais J.-F. Reuse of Acid Bioleachate in Bacterial Oxidation of a Refractory Gold Sulfide Concentrate // Minerals. – 2022. – Vol. 12, No. 9. – Art. 1087. – DOI: 10.3390/min12091087.
6. Hernández P., Recio G., Schwarz A. et al. Arsenic (III) and arsenic (V) removal from acidic mine waters using an acidophilic sulfate-reducing bioreactor // Hydrometallurgy. – 2023. – Vol. 221. – Art. 106137. – DOI: 10.1016/j.hydromet.2023.106137.
7. Kara I.T., Kremser K., Wagl S.T. et al. Bioleaching metal-bearing wastes and by-products for resource recovery: a review // Environmental Chemistry Letters. – 2023. – Vol. 21. – P. 3329–3350. – DOI: 10.1007/s10311-023-01611-4.
8. Maltrana V., Morales J. The Use of Acid Leaching to Recover Metals from Tailings: A Review // Metals. – 2023. – Vol. 13, No. 11. – Art. 1862. – DOI: 10.3390/met13111862.
9. Xu L., Zheng Y., Zhao Y., Chen W. Recovery of arsenic oxide, harmless gypsum residue and clean water by lime neutralization and precipitation // Hydrometallurgy. – 2023. – Vol. 215. – Art. 105996. – DOI: 10.1016/j.hydromet.2022.105996.
10. Kefeni K.K., Msagati T.A.M., Mamba B.B. Acid mine drainage: Prevention, treatment options, and resource recovery: A review // Journal of Cleaner Production. – 2017. – Vol. 151. – P. 475–493. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.03.082.
11. Skousen J., Zipper C.E., Rose A., Ziemkiewicz P.F., Nairn R. McDonald L.M., Kleinmann R.L. Review of Passive Systems for Acid Mine Drainage Treatment // Mine Water and the Environment. – 2017. – Vol. 36. – P. 133–153. – DOI: 10.1007/s10230-016-0417-1.

НЕФТЯНАЯ И ГАЗОВАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ. ПЕРЕРАБОТКА УГЛЕВОДОРОДНОГО СЫРЬЯ

Статья поступила в редакцию: 09.10.2026
Статья принята к публикации: 19.10.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 622.276+622.279+004.9

DOI: 10.32743/UniTech.2026.151.10.23592

Интегрированное моделирование системы «пласт-скважина-обустройство» для анализа причин снижения продуктивности и сценарной оценки работы массивных нефтегазоконденсатных залежей на поздней стадии

Ахатова Гулиза Анвар кизи
докторант (PhD)
Каршинский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Карши
ORCID: 0009-0002-7458-6668
E-mail: ahadovaguliza@gmail.com

Бозоров Улугбек Суюн угли
самостоятельный исследователь (PhD)
Каршинский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Карши
ORCID: 0009-0002-1622-6664
E-mail: ulugbek.bozorov.1991@gmail.com

Хайитов Лазиз Комилович
докторант (PhD)
Каршинский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Карши
ORCID: 0009-0008-6927-3636
E-mail: hayitovlaziz62@gmail.com

Саматов Шерзод Шавкатович
ст. преп
Университет экономики и педагогики
Республика Узбекистан, г. Карши
ORCID: 0009-0007-2995-6478
E-mail: sh.sh.samatov@gmail.com

Жураева Юлдуз Шамил кизи
магистр, Каршинский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Карши
ORCID: 0009-0000-2058-3272
E-mail: yulduzshamilovna2305@mail.ru

Библиографическое описание: Интегрированное моделирование системы «пласт-скважина-обустройство» для анализа причин снижения продуктивности и сценарной оценки работы массивных нефтегазоконденсатных залежей на поздней стадии // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Ахатова Г.А. кизи [и др.]. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23592

Integrated modelling of the “reservoir-well-surface facilities” system for productivity-decline diagnosis and scenario assessment of mature massive oil-gas-condensate accumulations

Akhatova Guliza Anvar qizi
PhD doctoral student
Karshi State Technical University
Uzbekistan, Karshi
Bozorov Ulugbek Suyun ogli
PhD, Independent researcher
Karshi State Technical University
Uzbekistan, Karshi
Khayitov Laziz Komilovich
PhD doctoral student
Karshi State Technical University
Uzbekistan, Karshi
Samatov Sherzod Shavkatovich
senior Lecturer
University of Economics and Pedagogy
Uzbekistan, Karshi
Jurayeva Yulduz Shamil qizi
Master’s degree holder, Karshi State Technical University
Uzbekistan, Karshi

Аннотация

Цель работы – оценить, как разные ограничения в цепи «пласт-скважина-система сбора» могут вызывать сходное снижение нормированной подачи на поздней стадии разработки нефтегазоконденсатных залежей. Использована стационарная модель узлового баланса давлений с линейной и квадратичной составляющими сопротивления притоку и дополнительными потерями в стволе и наземной сети. Пять сценариев рассчитаны на единых условных параметрах; промысловая калибровка не проводилась. Получены значения безразмерной подачи 1,174 для базового состояния, 1,000 при ухудшении прискважинной зоны, 1,000 при росте противодавления, 0,846 при сочетании факторов и 1,214 при согласованном изменении параметров. В последнем случае прирост относительно совместно ухудшенного сценария составляет 43,5 %, однако не доказывает достижение оптимального режима и не представляет прогноз добычи. Показано, что одинаковая подача не позволяет однозначно определить причину потерь без дополнительных измерений давлений. Практическое значение схемы состоит в предварительном разделении пластовых и технологических ограничений перед более детальным многофазным моделированием. Для применения к конкретным залежам необходимы PVT-данные, фазовые проницаемости, учёт конденсатного блокирования, геологической неоднородности и эксплуатационных ограничений.

Abstract

The study aims to determine how different restrictions within a reservoir-well-gathering system can produce similar reductions in normalized flow during late-stage oil-gas-condensate development. A steady-state nodal pressure-balance model combines linear and quadratic inflow resistance with wellbore and surface-network losses. Five scenarios use a common set of explicitly

hypothetical inputs; no calibration against field measurements was performed. The calculated dimensionless flow rates are 1.174 for the baseline, 1.000 for increased near-wellbore resistance, 1.000 for higher surface backpressure, 0.846 for their combined effect and 1.214 for a coordinated parameter adjustment. The final rate exceeds the combined-deterioration case by 43.5 %, but neither establishes an optimum operating point nor represents a field-production forecast. Equal observed rates cannot uniquely identify the underlying mechanism without additional pressure measurements. The model may therefore support preliminary screening of reservoir-related and surface-system restrictions before detailed multiphase simulation. Field application requires PVT characterization, phase relative permeabilities, condensate banking, geological heterogeneity, pressure-depletion dynamics and verified operating constraints.

Ключевые слова: газоконденсатная залежь, продуктивность скважин, узловой анализ, призабойная зона, противодавление, конденсатное блокирование, сценарный расчёт.

Keywords: gas-condensate accumulation, well productivity, nodal analysis, near-wellbore zone, backpressure, condensate banking, scenario analysis.

Введение

На поздней стадии разработки нефтегазоконденсатных залежей уменьшение дебита не всегда обусловлено исключительно снижением пластового давления или ухудшением фильтрационных свойств призабойной зоны. На фактическую подачу одновременно влияют гидравлические потери в стволе, противодавление трубопроводной сети и режим подготовки продукции. Для залежей массивного строения диагностика осложняется неоднородностью насыщения и распределения давления, поэтому увеличение проводимости пласта не обязательно приводит к соразмерному приросту подачи при наличии ограничений системы сбора. Задача заключается не только в оценке отдельных сопротивлений, но и в разграничении их совместного влияния.

Узловой анализ давно применяется для согласования характеристик притока и подъёма продукции. Так, Kamga Ngankam и соавт. [2] для нефтяной скважины исследовали влияние диаметра насосно-компрессорных труб, выкидной линии, устьевого давления и скин-фактора; расчёт с опорой на PVT- и промысловые данные позволил обосновать изменение рабочего режима. Преимущество такого подхода – связь технологических параметров с рабочей точкой скважины; ограничение при переносе на другую залежь – необходимость настройки исходных зависимостей и учёта её флюидных свойств.

В работе Mepaiyeda и соавт. [3] интегрированы модели пласта, скважин и наземной сети для нефтедобывающего объекта дельты Нигера; рассмотрены давление сепарации, штуцирование и переключение маршрутов потока. Yadua и Lawal [7] предложили расчёт производительности интегрированной системы с включением скважин, штуцеров, трубопроводов и сепараторов, причём результаты были сопоставлены с полевыми данными. Эти исследования демонстрируют пользу системного подхода, однако их численные эффекты зависят от конкретной инфраструктуры и проверенных параметров. Поэтому перенос достигнутых приростов на иной объект без идентификации коэффициентов методически некорректен.

Обзор Yu и соавт. [8] показывает развитие совместного моделирования «пласт-ствол-трубопроводная сеть» с согласованием давления и ограничений взаимодействующих подсистем. В последующем исследовании Yu и соавт. [9] интегрированный расчёт рассмотрен для нефтяных месторождений с очень высокой обводнённостью. Эти разработки существенно полнее простого стационарного баланса, поскольку ориентированы на эксплуатационные системы и комплексное регулирование. Вместе с тем используемые в нефтяных задачах зависимости нельзя без дополнительных предпосылок считать достаточными для газоконденсатного течения.

Специфику газоконденсатных залежей отражают Fevang и Whitson [1], исследовавшие продуктивность газоконденсатных скважин с учётом фазовых явлений, а также Reis и Carvalho [5], предложившие композиционное моделирование течения на поровом уровне и показавшие зависимость относительных фазовых проницаемостей от условий потока. Safari-Beidokhti и Hashemi [6] анализировали влияние конденсатного блокирования для трещиновато-пористых коллекторов; Zeinedini и соавт. [10] применили комбинированные вычислительные подходы к оценке относительной проницаемости. Физико-химические процессы в призабойной зоне различных коллекторов рассмотрены Meyliev и соавт. [4]. Следовательно, расчёт только с постоянными коэффициентами сопротивления не описывает выпадение конденсата, изменение насыщенностей и реальную динамику истощения.

Таким образом, в опубликованных работах подробно представлены как узловой анализ, так и многофазное интегрированное моделирование. В настоящей работе не предлагается новый закон фильтрации и не заявляется более высокая точность по сравнению с промыслово калиброванными моделями. Научно-методическая задача состоит в другом: на одном воспроизводимом наборе граничных условий показать, что различающиеся по физическому происхождению ограничения могут дать одинаковую нормированную подачу, и определить, какие измерения необходимы для их последующего различения. Цель исследования – сопоставить пять демонстрационных сценариев и установить границы применимости упрощённого баланса давления. Все параметры условны; геометрия массивной залежи, фазовое состояние и характеристики конкретного промысла в расчёт не включены.

Материалы и методы

При заданной стационарной точке рассматриваются одна скважина и эквивалентные потери в системе сбора. Введена нормированная подача $x = q/q_{\text{оп}}$, где $q_{\text{оп}}$ - условный нормирующий расход. Баланс давлений:

$$p_{\text{пл}} - p_{\text{сеп}} - C = Ax + (B + D)x^2. \quad (1)$$

Здесь $p_{\text{пл}}$, $p_{\text{сеп}}$ - пластовое и сепарационное давления; A, B - коэффициенты сопротивления притоку; C - условные постоянные потери; D - расходозависимые потери ствола и сбора (все коэффициенты - в МПа). Положительный корень при $A > 0$, $B + D > 0$ и $p_{\text{пл}} - p_{\text{сеп}} - C > 0$ равен:

$$x = \frac{-A+\sqrt{A^2+4(B+D)\left(p_{\text{пл}}-p_{\text{сеп}}-C\right)}}{2(B+D)}. \quad (2)$$

В уравнении (1) величина A характеризует линейную составляющую сопротивления притоку, B – его квадратичную составляющую, D – суммарные расходозависимые потери в стволе и наземной сети, а C – условную постоянную составляющую потерь. Разделение квадратичных слагаемых позволяет независимо изменять условное сопротивление прискважинной зоны и наземной части системы. Все коэффициенты относятся к выбранной нормировке расхода qоп; их значения нельзя переносить на реальные скважины без восстановления размерных зависимостей и калибровки по замерам.

Во всех сценариях условно $p_{пл} = 18$ МПа и $C = 4$ МПа (табл. 1). Повышение A, B моделирует ухудшение ПЗП, повышение $p_{сеп}$ - рост противодавления. Вариант «Настройка» задаёт частичное уменьшение обоих ограничений. Диапазоны подобраны только для демонстрации контрастов; их промысловая реализуемость не подтверждена.

В таблице 1 использованы пять иллюстративных сочетаний параметров при неизменных $p_{пл}$ = 18 МПа и C = 4 МПа. Для имитации ухудшения прискважинной зоны A увеличено с 5,0 до 6,5 МПа, B – с 2,0 до 2,5 МПа; для имитации роста противодавления $p_{сеп}$ увеличено с 4,0 до 6,0 МПа. В объединённом случае действуют оба изменения. В сценарии «Настройка» условно приняты $p_{сеп}$ = 3,2 МПа, A = 5,5 МПа, B = 2,0 МПа и D = 0,8 МПа. Числа выбраны для получения отчётливо различимых модельных ситуаций, а не по данным какого-либо месторождения; диапазоны не являются рекомендованными рабочими уставками оборудования.

Таблица 1. Условные параметры и результаты пяти сценариев

Параметр	База	ПЗП	Сбор	Оба	Настройка
$p_{сеп}$, МПа	4,0	4,0	6,0	6,0	3,2
A, МПа	5,0	6,5	5,0	6,5	5,5
B, МПа	2,0	2,5	2,0	2,5	2,0
D, МПа	1,0	1,0	1,0	1,0	0,8
Подача x	1,174	1,000	1,000	0,846	1,214
К базе, %	0,0	−14,8	−14,8	−27,9	+3,4

Область применимости схемы ограничена одной условной стационарной рабочей точкой, положительной разностью давлений и заданным набором постоянных коэффициентов. Модель не учитывает взаимосвязь фазового состава с давлением, выпадение конденсата ниже давления начала конденсации, зависимости krg(Sc) и krc(Sc), а также изменение проницаемости и пластового давления во времени. Поэтому для реального газоконденсатного объекта требуется сначала определить фазовые характеристики по PVT-исследованиям, уточнить параметры насыщения и фильтрации, затем согласовать расчёт со скважинными и наземными измерениями [1, 5, 6, 10].

Результаты и обсуждение

Исходному варианту соответствует $3x^2 + 5x - 10 = 0$ и $x = 1,174$, совместному ухудшению - $3,5x^2 + 6,5x - 8 = 0$ и $x = 0,846$. Итоги представлены в таблице 1 и на рисунке 1.

Сопоставление показывает диагностическую неоднозначность: два разных изменения – повышение сопротивлений A и B либо увеличение $p_{сеп}$ – дают одинаковую подачу x = 1,000, то есть снижение примерно на 14,8 % относительно базового режима. Сочетание ограничений уменьшает x до 0,846 (−27,9 %). Таким образом, одного наблюдаемого дебита недостаточно для выбора между воздействием на призабойную зону и изменением режима наземной сети.

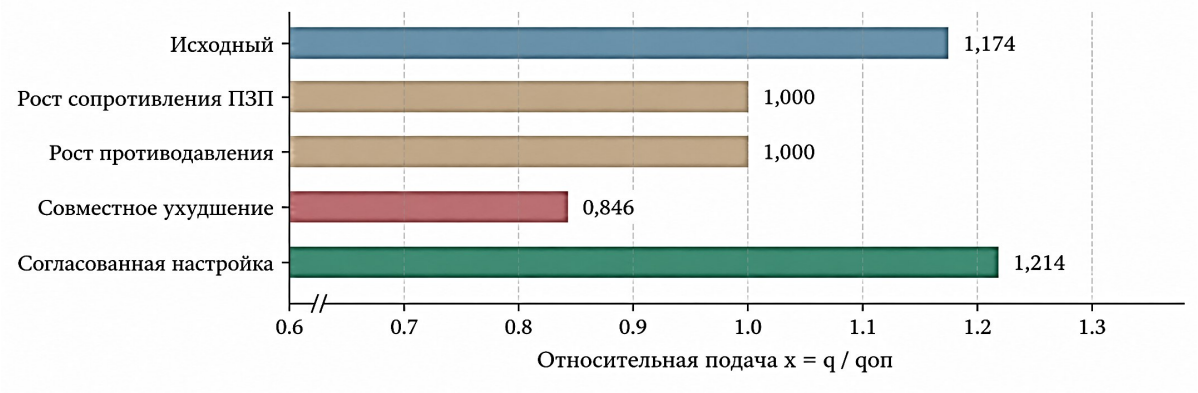


Рисунок 1. Сопоставление нормированных подач

При ухудшении ПЗП и при росте давления сепарации одинаково $x = 1,000$, хотя причины различны. Для их различения необходимы измерения пластового, забойного, устьевого и сепарационного давлений. Условная «Настройка» повышает x на 43,5 % относительно «Оба», или на 3,4 % к базе; это не прогноз промысловой добычи.

Рост нормированной подачи от 0,846 до 1,214 составляет (1,214/0,846−1)·100 % ≈ 43,5 % по более точным вычисленным значениям; относительно исходного состояния изменение равно примерно +3,4 %. Это только результат сравнения заранее заданных сценариев. В отличие от полевых интегрированных исследований [2, 3, 7, 9], в данной схеме не выполнялись подбор управляющих переменных по целевой функции, проверка допустимого давления сепарации, расчёт пропускной способности и экономическое обоснование. Поэтому термин «оптимальный режим» к сценарию «Настройка» неприменим.

Чувствительность имеет знаки $\frac{\partial x}{\partial A} = -\frac{x}{K} < 0$ и $\frac{\partial x}{\partial p_{сеп}} = -\frac{1}{K} < 0$, где $K = A + 2(B + D)x$. Оптимизация не доказана: отсутствуют целевая функция, эксплуатационные ограничения и идентификация коэффициентов по измерениям [3, 7-9].

Для практической диагностики необходим совместный ряд наблюдений пластового, забойного, устьевого и сепарационного давлений, фактического расхода, состава продукции и параметров системы сбора. Если повышается сопротивление призабойной зоны, требуется дополнительно исследовать её состояние и возможное конденсатное блокирование; если возрастает противодавление, следует проверить ограничения трубопроводов и сепарации. Тем самым представленная модель не заменяет многофазный расчёт, а помогает сформулировать проверяемые гипотезы для последующей идентификации причин снижения продуктивности.

Заключение

Упрощённый узловой баланс давления позволил воспроизводимо сопоставить пять условных режимов системы «пласт-скважина-обустройство». Показано, что ухудшение проводимости прискважинной зоны и рост наземного противодавления могут приводить к одинаковой нормированной подаче (x = 1), тогда как совместное действие двух ограничений снижает её до 0,846. Согласованное изменение условных параметров повышает расчётную подачу до 1,214, что соответствует +43,5 % относительно совместно ухудшенного сценария, но не доказывает оптимальности режима и не прогнозирует фактическую добычу. Прикладное назначение схемы – предварительная идентификация возможных ограничений и обоснование программы измерений. Дальнейшее использование для массивных нефтегазоконденсатных залежей требует учёта фазовых превращений, конденсатного блокирования, неоднородности пласта, динамики давления, технологических ограничений и калибровки по промысловым данным.

Список литературы

1. Fevang O., Whitson C.H. Modeling Gas-Condensate Well Deliverability // SPE Reserv. Eng. – 1996. – T. 11, № 4. – P. 221–230. – DOI: 10.2118/30714-PA.
2. Kamga Ngankam R.M., Dongmo E.D., Nitcheu M. et al. Production Step-Up of an Oil Well through Nodal Analysis // J. Eng. – 2022. – Art. 6148337. – DOI: 10.1155/2022/6148337.
3. Mepaiyeda E.B., Aghabuilo C.G., Saliu O. Optimizing oil field productivity using integrated system modelling: A comprehensive approach for identifying and maximizing oil production in a Niger Delta field // J. Pet. Gas Eng. – 2024. – T. 16, № 2. – P. 17–28. – DOI: 10.5897/JPGE2024.0377.
4. Meyliev X.B., Samatov Sh.Sh., Boykobilova M.M. Physicochemical transformation processes in the near-wellbore zone of different reservoir types // Innovatsion texnologiyalar. – 2025. – № 4 (60). – P. 33–41. – DOI: 10.70769/2181–4732.ITJ.2025–4.04.
5. Reis P.K.P., Carvalho M.S. Pore-scale compositional modeling of gas-condensate flow: Effects of interfacial tension and flow velocity on relative permeability // J. Pet. Sci. Eng. – 2021. – T. 202. – Art. 108454. – DOI: 10.1016/j.petrol.2021.108454.
6. Safari-Beidokhti M., Hashemi A. Condensate blockage effects in well test analysis of dual-porosity/dual-permeability, naturally fractured gas condensate reservoirs: a simulation approach // J. Pet. Explor. Prod. Technol. – 2016. – T. 6. – P. 729–742. – DOI: 10.1007/s13202-015-0214-6.
7. Yadua A.U., Lawal K.A. A new method to evaluate integrated production system capacity in oil fields // Pet. Explor. Dev. – 2023. – T. 50, № 3. – P. 665–674.
8. Yu H., Wang Y., Cheng C. et al. Advances and outlook of integrated reservoir-wellbore-pipe network simulation technology // Energy Geoscience. – 2024. – T. 5, № 4. – Art. 100315. – DOI: 10.1016/j.engeos.2024.100315.
9. Yu H., Wang P., Wang Y. et al. Integrated Simulation and Optimization of Reservoir-Wellbore-Surface Systems in Ultrahigh Water Cut Oil Fields // Energy Sci. Eng. – 2025. – T. 13, № 7. – P. 3503–3514. – DOI: 10.1002/ese3.70124.

10. Zeinedini E., Dabir B., Dadvar M. Integrating computational fluid dynamic, artificial intelligence techniques, and pore network modeling to predict relative permeability of gas condensate // Scientific Reports. – 2022. – T. 12. – Art. 21457. – DOI: 10.1038/s41598-022-24468-z.

Статья поступила в редакцию: 24.09.2026
Статья принята к публикации: 05.10.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 622.279.63:550.8.023

DOI: 10.32743/UniTech.2026.151.10.23502

Лабораторное исследование процесса кислотной обработки призабойной зоны трещиноватых карбонатных коллекторов месторождений Бухаро-Хивинского нефтегазоносного региона

Кан Кирилл Эдуардович
мл. науч. сотр
АО O‘ZLITINEFTGAZ
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: altair.k98@gmail.com

Laboratory study of matrix acidizing in fractured carbonate reservoirs of the Bukhara-Khiva oil and gas region

Kan Kirill Eduardovich
Junior Researcher
JSC O‘ZLITINEFTGAZ
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

Цель работы – сравнить эффективность четырех кислотных композиций на основе соляной, уксусной и лимонной кислот на керне трещиноватых карбонатных коллекторов двух месторождений Бухаро-Хивинского региона (М1 и М2), залегающих на глубинах 2936-3590 м. Минеральный состав пород определен методом рентгенофазового анализа. Композиции испытаны методом прямой закачки в 16 цилиндрических образцов керна (по 8 на каждый объект) при температуре 70 °С, всестороннем давлении 20 МПа и давлении нагнетания до 18 МПа. Испытание считалось успешным при прорыве, то есть при падении давления нагнетания с образованием канала растворения. Подтверждающим признаком служил рост абсолютной проницаемости по газу и воде; до и после закачки измеряли также открытую пористость. Прорыв зафиксирован в 7 из 16 испытаний (3 на М1 и 4 на М2). Во всех этих случаях проницаемость по газу выросла примерно на 2-4 порядка, а открытая пористость – на 0,65-2,79 процентных пункта. Наиболее результативными оказались смесь соляной и уксусной кислот со спиртом для М1 (прорыв в обоих испытаниях) и ее модификация с добавлением поверхностно-активного вещества для М2 (прорыв в двух из трех испытаний). Различия в результативности составов, вероятно, связаны с литологической

Библиографическое описание: Кан К.Э. Лабораторное исследование процесса кислотной обработки призабойной зоны трещиноватых карбонатных коллекторов месторождений Бухаро-Хивинского нефтегазоносного региона // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23502

неоднородностью коллекторов. Лабораторные испытания подтвердили возможность образования протяженных каналов растворения в низкопроницаемых карбонатных породах М1 и М2.

Abstract

The aim of this study was to compare the effectiveness of four acid formulations based on hydrochloric, acetic and citric acids on core samples from fractured carbonate reservoirs of two fields in the Bukhara-Khiva region (M1 and M2) at depths of 2936–3590 m. The mineral composition of the rocks was determined by X-ray diffraction. The formulations were tested by direct core flooding on 16 cylindrical core plugs (eight per field) at 70 °C, a confining pressure of 20 MPa and an injection pressure of up to 18 MPa. A test was considered successful if breakthrough occurred, i.e. the injection pressure dropped and a dissolution channel (wormhole) formed. An increase in absolute gas and water permeability served as confirmation; open porosity was also measured before and after injection. Breakthrough was recorded in 7 of 16 tests (3 for M1 and 4 for M2). In all these cases gas permeability increased by roughly two to four orders of magnitude and open porosity by 0.65–2.79 percentage points. The most effective formulations were a hydrochloric–acetic acid mixture with alcohol for M1 (breakthrough in both tests) and its surfactant-modified version for M2 (breakthrough in two of three tests). The differences in formulation performance are probably related to the lithological heterogeneity of the reservoirs. The laboratory tests confirmed that extended dissolution channels can form in the low-permeability carbonate rocks of M1 and M2.

Ключевые слова: кислотная обработка, карбонатный коллектор, керн, прямая закачка, проницаемость, пористость, червоточины, соляная кислота, уксусная кислота, лимонная кислота.

Keywords: acidizing, carbonate reservoir, core plug, core flooding, permeability, porosity, wormholes, hydrochloric acid, acetic acid, citric acid.

Введение

Процесс освоения и эксплуатации коллекторов приводит к кальматированию и деформации коллекторов [3], в особенности это проявляется в карбонатных коллекторах, которые характеризуются низкими фильтрационно-емкостными свойствами и высокой степенью литологической неоднородности [4]. Одним из наиболее распространенных методов повышения продуктивности таких коллекторов является кислотная обработка (КО) призабойной зоны пласта [7]. Она основана на растворении минералов карбонатной группы, такие как карбонаты, доломиты и сидериты, и в меньшей степени глинистыми минералами. Из-за быстрой реакции карбонатов с основными компонентами кислотных составов образуются протяженные высокопроницаемые каналы течения – червоточины [8]. Снижение фильтрационного сопротивления вблизи ствола скважины при их формировании значительно увеличивает продуктивность скважин по сравнению с равномерным, поверхностным растворением породы [6]. Важной составляющей кислотной обработки является соотношение скорости химической реакции составов с породой и их степень проникновения в пласт. Так быстрая реакция приводит к полному расходованию кислоты в узкой зоне

непосредственно у стенок скважин, а избыточно медленная реакция не обеспечивает достаточной интенсивности воздействия [5]. Поэтому выбор рецептуры требует лабораторного обоснования, включающего оценку минерального состава породы, изменения фильтрационно-емкостных свойств и прямые испытания закачки составов в образцы керна.

Настоящая работа выполнена с использованием материала двух месторождений со сложнопостроенными трещинными карбонатными коллекторами, условно обозначенными далее как М1 и М2. Оба объекта характеризуются низкими и очень низкими значениями открытой пористости и абсолютной проницаемости, а также выраженной литологической неоднородностью, однако отличаются друг от друга по составу и степени однородности карбонатного разреза, что делает целесообразным раздельный анализ эффективности кислотных композиций для каждого из объектов.

Цель исследования – сравнительная лабораторная оценка эффективности четырёх кислотных композиций на основе соляной, уксусной и лимонной кислот при воздействии на керн карбонатных коллекторов месторождений М1 и М2 и определение наиболее результативного состава для каждого объекта по результатам фильтрационных испытаний.

Для достижения цели необходимо было решить следующие задачи:

- охарактеризовать минеральный состав пород (методом рентгенофазового анализа) и фильтрационно-емкостные свойства образцов керна М1 и М2;
- испытать четыре кислотные композиции методом прямой закачки в цилиндрические образцы керна;
- сопоставить результативность отобранных составов раздельно для объектов М1 и М2;
- сформулировать практические рекомендации и ограничения исследования.

Материалы и методы

Объектом исследования послужил керн двух месторождений: М1 (интервалы глубин 2936 – 2967 м, верхняя Юра, XV горизонт) и М2 (интервалы глубин 3552 – 3590 м, верхняя Юра, XV горизонт). Керн М1 представлен светло-серым и серым известняком плотным, массивным, органогенно-детритовым. В нижней части слоя порода имеет более темно-серую окраску. В породе отмечаются включения обломков кальцита и остатков водорослей (рис. 1. а-г). Керн М2 представлен серым и темно-серым известняком органогенно-детритовым, водорослевым, плотным, массивным. В породе отмечаются остатки двустворчатых моллюсков, брахиопод и остракод. Образцы рассечены мелкими трещинами различной ориентировки, заполненными черным алевролитовым материалом (рис. 1. д-з).

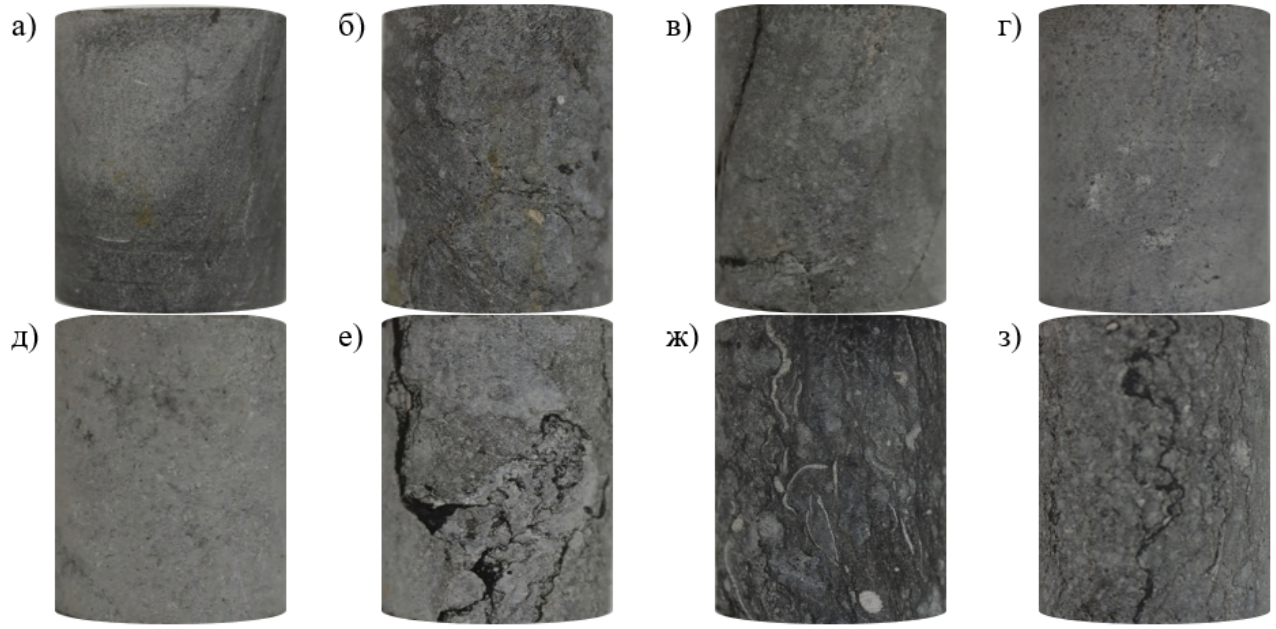


Рисунок 1. Фотографии образцов керна а) обр. 2 М1 (2936); б) обр. 5 М1 (2937); в) обр. 7 М1 (2938); г) обр. 8 М1 (2965); д) обр. 2 М2 (3585); е) обр. 4 М2 (3586); ж) обр. 14 М2 (3589); з) обр. 16 М2 (3590)

Количественный рентгенофазовый анализ (РФА) исходной породы выполнен на 2 образцах для М1 и 3 образцах М2. Для количественного (РФА) состав пород применялся дифрактометр XRD-7000 (Shimadzu, Япония) с медным анодом. Образцы предварительно измельчались согласно аппаратной методике до фракции мельче 0.1 мм и размер навески составляет в среднем около 1 г. Работы выполнялись в режиме непрерывного сканирования с диапазоном углов 3-93º с шагом 0.02º при напряжении 30 кВ и силе тока 20 мА с вращением кюветы со скоростью 60 об/мин. Для количественной оценки использовался программный продукт «March!», в основе которого лежит уравнение Петера-Кальмана и предположение, что сумма всех кристаллических фаз составляет 100 %.

Параметры ФЕС определялись на различных установках: открытая пористость образцов – методом газоволюметрической порометрии на установке ПИК-П (Геологика, Россия) с диапазоном измерений 0,6 до 50 % и погрешностью 0,2 %; абсолютная проницаемость по газу (воздух) и фазовая проницаемость по воде (10 % раствор NaCl) с помощью ПИК-ОФП (Геологика, Россия) с диапазоном замера расхода флюида 0.0001 – 50.000 мл/мин с точностью 0.5 %, горного давления 1 – 70 МПа с точностью 0.5 %, порового давления 0.01 – 40.00 МПа с точностью 0.5 %.

В качестве реагентов применялись: 32 %-ный раствор соляной кислоты (HCl), лимонная кислота квалификации «х.ч.», 70 %-ный раствор уксусной кислоты (CH_3COOH), 96 %-ный раствор этилового спирта, сульфанол (ПАВ) и ингибиторы коррозии (ИК) анодного характера [1].

Испытания по кислотному воздействию проводились на установке Индивидуального капилляриметра ПИК-ИГК (Геологика, Россия), для создания заданных термобарических условий в виде параметров обжимного давления 1 – 70 МПа с погрешностью 0.5 % и максимальной рабочей температурой до 150 °С с погрешностью 1 °С, и лабораторный

однопоршневой насос ЛН-П-1000-1000 (Геологика, Россия) с диапазоном рабочего давления 0 – 100 МПа (погрешность 0.15 %), максимальным расходом 35 мл/мин (погрешность 0.05 мл).

Кислотный раствор закачивался в образец при температуре 70 °C, всестороннем давлении 20 МПа и постепенно повышаемом давлении нагнетания вплоть до 18 МПа, с временем эксперимента от 1 до 3 часов. Для каждого эксперимента количество прокачиваемых составов рассчитывалось в виде 10-кратного объема пор образца и скорость подачи составляла 0.1 мл/мин. При прорыве скорость прокачки увеличивалась до 0.5 мл/мин. «Пластовая» температура в экспериментах по закачке выбрана исходя из средней пластовой температуры около скважин для представленных горизонтов с округлением: для М1 – 67 ºС и для М2 – 75 ºС. Всестороннее давление принято равным 20 МПа исходя из предполагаемой максимальной репрессии на пласт при обработке (превышения давления в скважине над пластовым), чтобы давление нагнетания (до 18 МПа) не превышало давление обжима. Изменение ФЕС вследствие действия полного горного давления в данной работе не моделировалось.

Время выдержки зависело от того происходит ли фильтрация раствора через образец. Если в течение 2 часов не происходило выхода раствора, то эксперимент останавливался. В другом если после 2 часов происходила фильтрация, но рассчитанный объем не был прокачан, то эксперимент продолжался еще в течение 1 часа.

До и после закачки для каждого образца определялись открытая пористость и абсолютная проницаемость по газу и по воде. Обработка считалась успешной (образование червоточины) при резком падении давления нагнетания (давление прорыва) с образованием сквозного проводящего канала. В случае прорыва прокачка кислотного раствора продолжалась с учетом установленных объемов. Если прорыва не происходило до достижения максимального давления нагнетания (18 МПа) и истечения времени эксперимента, испытание считалось безуспешным («не прошла»). Рост проницаемости использовался как подтверждающий признак. Рост пористости не служил оценочным критерием из-за того, что в обоих случаях при образовании непроводящих каверн и проводящих каналов проявляется рост открытой пористости.

Результаты и обсуждение

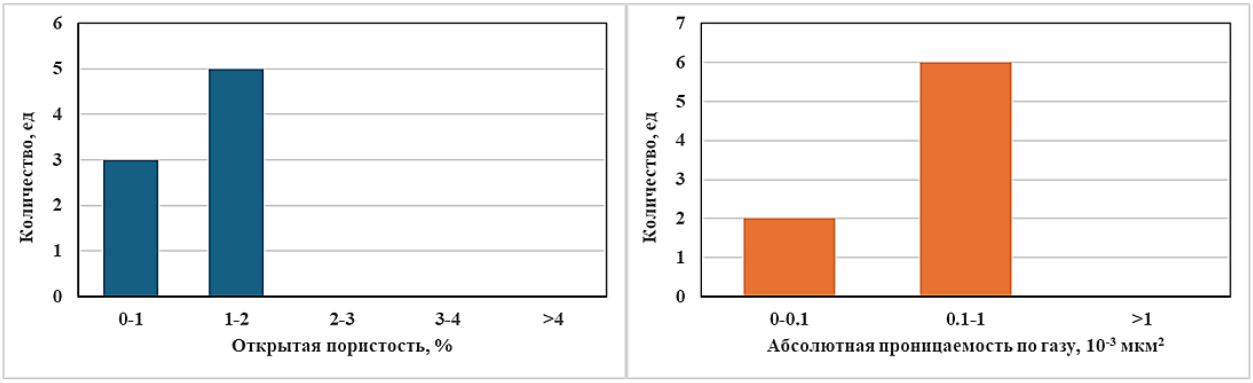
По данным РФА (табл. 1), исходный состав пород М1 в исследуемых интервалах представлен преимущественно кальцитом (в среднем ~76,7 % по двум исследованным образцам), с подчиненной долей глинистых (7,0-8,7 %) и породообразующих терригенных минералов (11,5-12,9 %). Разрез М2 в представленном горизонте характеризуется большей неоднородностью: выделяются смешанный карбонатно-терригенный интервал (карбонатность ~48,8 %, терригенная примесь ~36,9-45,7 %) и существенно более карбонатные интервалы (в среднем ~76,2 % карбонатов при терригенной примеси ~21,0 %).

Таблица 1. Минералогический состав М1 и М2

№	Объект	Глубина отбора	Содержание основных породообразующих минералов, %																	
			Глинистые					Карбонатные			Породообраз.			Другие				Всего			
			Мусковит	Монтмориллонит	Иллит	Хлорит	Каолинит	Кальцит	Доломит	Сидерит	Кварц	Альбит	Ортоклаз	Пирит	Ангидрит	Апатит	Гематит	Глинистые	Карбонатные	Породообраз.	Другие
1	М1	2937	1.0	2.3	3.7	0.9	0.8	74.7	0.1	1.0	9.9	0.8	2.2	-	0.2	2.4	-	**8.7**	**75.8**	**12.9**	**2.6**
2	М1	2967	0.2	0.1	5.2	1.5	-	78.6	0.7	-	8.8	1.7	1.0	-	0.4	1.8	-	**7.0**	**79.3**	**11.5**	**2.2**
3	М2	3552-3558	0.7	1.7	3.0	1.2	2.2	47.4	0.7	0.7	27.5	5.3	4.1	-	3.9	1.6	-	**8.8**	**48.8**	**36.9**	**5.5**
4	М2	3585	0.4	2.2	3.0	0.6	1.2	79.0	1.3	-	4.3	1.0	3.7	-	0.5	2.8	-	**7.4**	**80.3**	**9.0**	**3.3**
5	М2	3588	-	2.6	3.1	2.0	2.4	67.1	5.0	-	9.5	0.3	5.6	-	2.4	-	-	**10.1**	**72.1**	**15.4**	**2.4**

Породы М2 (рис. 2б) характеризуются открытой пористостью в атмосферных условиях от 0,42 до 4,27 % (в среднем 2,2 %) и абсолютной проницаемостью от 0,09 до 4,31 · 10^{-3} мкм^2 (в среднем 1,81 · 10^{-3} мкм^2). Породы М1 (рис. 2а) отличаются более узким диапазоном пористости (0,30-1,65 %, в среднем 1,07 %) и меньшей абсолютной проницаемостью (0,04-0,71 · 10^{-3} мкм^2, в среднем 0,25 · 10^{-3} мкм^2), но большей однородностью объемной плотности (2,639-2,714 г/см³ против 2,553-2,687 г/см³ у М2). По классификации Багринцевой [2] оба объекта по показателям открытой пористости и проницаемости отнесены к классу В-VII – трещинному типу коллектора.

а)



б)

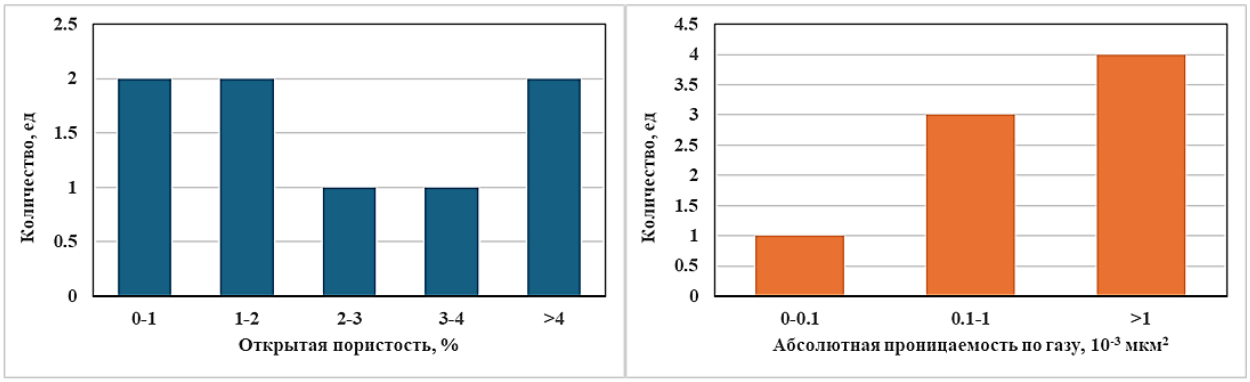


Рисунок 2. Гистограммы открытой пористости и абсолютной проницаемости по газу а) М1; б) М2

Для лабораторных испытаний по закачке были использованы 4 раствора, подобранных исходя из предыдущих опытных работ [11, 12]:

Состав 2 – 1: 20 % CH_3COOH + 5 % Спирт + 15 % HCl + 1 % ИК1 + 1 % ИК2;

Состав 2 – 2: 20 % CH_3COOH + 5 % Спирт + 15 % HCl + 1 % ИК1 + 1 % ИК2 + 1 % ПАВ;

Состав 2 – 3: 20 % Лим.к + 2 % Спирт + 12 % HCl + 1 % ИК1 + 1 % ИК2

Состав 2 – 4: 20 % Лим.к + 2 % Спирт + 15 % HCl + 1 % ИК1 + 1 % ИК2.

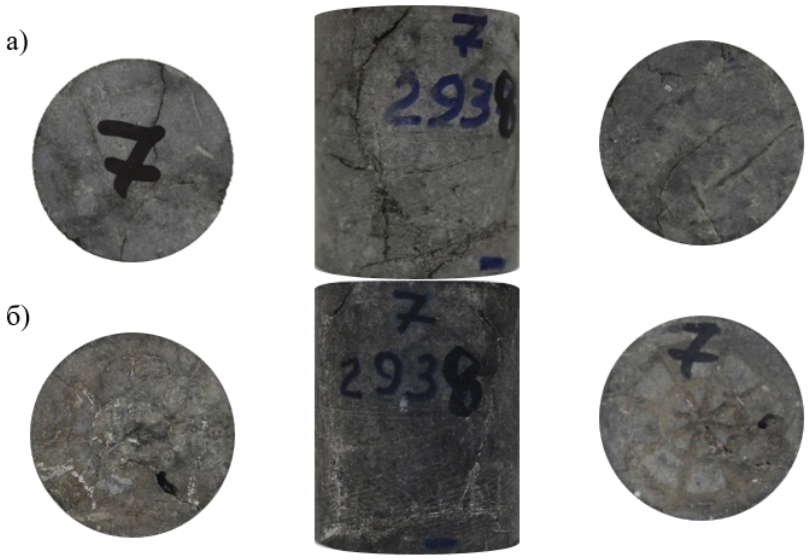


Рисунок 3. Фотографии образца 7 М1 а) до кислотной обработки; б) после кислотной обработки (слева точка входа, справа точка выхода)

По результатам испытаний четырех композиций на 16 цилиндрических образцах керна (по 8 на каждый объект исследования) прорыв с образованием червоточины зафиксирован в семи случаях из шестнадцати: на трех образцах М1 и четырех образцах М2 (табл. 2). Формирование червоточины во всех семи случаях сопровождалось ростом абсолютной проницаемости по газу на 2-4 порядка и приростом открытой пористости (от +0,65 до +2,79 процентных пункта). Пример образования проводящего канала показан на рисунке 3.

В образцах без прорыва пористость после обработки как снижалась, так и увеличивалась (табл. 2). Однако у ряда образцов (№ 1 и 14 для М2; № 1, 2 и 4 для М1) проницаемость по газу и/или воде после обработки увеличилась без образования значительного проводящего канала. Данный факт может свидетельствовать о частичном растворении карбонатной составляющей в поровом пространстве и вдоль существующих микротрещин, в результате чего возникли локальные пути фильтрации, не достигшие размера сквозного канала. Не исключено также, что часть эффекта связана с выносом мелких частиц и глинистого материала из поровых каналов. Разнонаправленное изменение проницаемости по газу и по воде в одном образце (М2 обр. 1 и 14; М1 обр. 1 и 4) указывает на неравномерный характер воздействия кислоты на порово-трещинное пространство.

Таблица 2. Изменение ФЕС в образцах керна

Образец (глубина, м)	Размеры (длина/ширина), см	Об. плотность, г/см^3	Состав	$K_п$, %		$K_{пр\ (г)}$, 10^{-3} мкм^2		$K_{пр\ (в)}$, 10^{-3} мкм^2		$t_{зак}$, ч	$P^*_{зак.}$, МПа	Результат
				до КО	после КО	до КО	после КО	до КО	после КО			
1 М2 (3585)	4.361 / 2.966	2.600	2-3	1.015	0.956	2.661	4.695	0.177	0.120	2	18	**не прошла (рост $K_{п\ р\ (г)}$)**
2 М2 (3585)	4.223 / 2.966	2.594	2-1	4.015	2.687	0.658	0.021	0.181	0.002	2	18	**не прошла**
4 М2 (3586)	4.232 / 2.965	2.644	2-2	2.216	3.186	4.308	231.178	непр	103.786	1	14.2	**прорыв**
6 М2 (3586)	3.591 / 2.965	2.628	2-4	3.192	2.298	0.092	0.010	0.231	0.002	2	18	**не прошла**
7 М2 (3586)	4.152 / 2.976	2.600	2-1	4.274	6.259	0.152	963.763	непр	118.786	3	18	**прорыв**
14 М2 (3589)	4.327 / 2.965	2.687	2-2	0.424	0.646	0.406	0.079	0.139	0.152	2	18	**не прошла (рост $K_{п\ р\ (в)}$)**
16 М2 (3590)	4.293 / 2.965	2.553	2-3	0.908	1.557	4.181	337.509	0.152	109.084	1	12.4	**прорыв**
17 М2 (3590)	4.089 / 2.969	2.638	2-2	1.557	2.465	2.049	693.207	непр	123.051	1	6.3	**прорыв**
1 М1 (2936)	4.139 / 2.961	2.658	2-4	1.024	1.151	0.100	0.026	непр	0.019	2	18	**не прошла (рост $K_{п\ р\ (в)}$)**
2 М1 (2936)	4.054 / 2.958	2.639	2-3	1.248	2.643	0.044	0.592	непр	0.206	2	18	**не прошла (рост $K_{п\ р\ (г)}$ и $K_{п\ р\ (в)}$)**
4 М1 (2937)	3.806 / 2.949	2.658	2-3	1.190	0.777	0.247	0.087	непр	0.127	2	18	**не прошла (рост $K_{п\ р\ (в)}$)**
5 М1 (2937)	3.783 / 2.969	2.714	2-2	1.649	3.847	0.105	343.767	непр	111.951	2	18	**прорыв**
7 М1 (2938)	4.0768 / 2.967	2.652	2-1	1.246	2.737	0.707	932.439	0.147	352.123	1	3.2	**прорыв**
8 М1 (2965)	4.329 / 2.97	2.639	2-1	0.982	3.774	0.306	529.529	0.250	102.912	1	16.3	**прорыв**
9 М1 (2966)	3.888 / 2.967	2.646	2-3	0.900	0.509	0.265	0.039	0.144	0.061	2	18	**не прошла**
10 М1 (2966)	4.167 / 2.968	2.656	2-2	0.303	0.321	0.256	0.084	0.203	0.192	2	18	**не прошла**

**Давление закачки – давление прорыва / максимальное давление при отсутствии прорыва*

Результаты получены при всестороннем давлении 20 МПа, которое ниже горного давления на глубинах залегания М1 и М2. Влияние уплотнения породы и смыкания трещин на фильтрационные свойства при пластовых напряжениях не оценивалось, поэтому абсолютные значения проницаемости следует рассматривать как сопоставимые между собой (в атмосферных условиях), а не как пластовые.

Полученные результаты в целом согласуются с общепринятой теорией формирования червоточин при кислотной обработке карбонатных коллекторов: соотношение скорости реакции кислоты и скорости фильтрации раствора определяет геометрию каналов растворения, а баланс достигается при сочетании достаточно высокой начальной активности состава с её постепенным, растянутым во времени воздействием [9, 10]. Различие в представленных составах для М1 и М2 (2-1 без ПАВ для первого объекта, 2-2 с добавлением ПАВ для второго) вероятно связано с различием в степени литологической однородности коллекторов. Разнонаправленное изменение фазовых проницаемостей без образования сквозного канала указывает на частичное растворение породы, вероятно сопровождавшееся миграцией мелких частиц и локальной кольматацией порового пространства.

Заключение

1. Лабораторные исследования подтвердили возможность интенсификации притока в трещиноватых карбонатных коллекторах месторождений М1 и М2 за счет образования протяженных каналов растворения.

2. Прорыв с образованием червоточины зафиксирован в 7 из 16 испытаний; во всех случаях он сопровождался ростом абсолютной проницаемости по газу на 2 – 4 порядка и приростом открытой пористости на 0,65 – 2,79 п.п.

3. Для литологически более выдержанного разреза М1 наиболее результативным среди испытанных является состав 20 % CH3COOH + 5 % Спирт + 15 % HCl + 1 % ИК1 + 1 % ИК2; для более неоднородного разреза М2 предпочтителен аналогичный состав с добавлением ПАВ.

4. Различия в составах для М1 и М2, вероятно, связаны с разной степенью литологической однородности коллекторов; естественная неоднородность керна определяет вероятностный характер образования червоточин, что нужно учитывать при проектировании объемов кислотных обработок в реальных скважинах.

Список литературы

1. Андреев К.В. Анализ применения кислотных составов в высокотемпературных карбонатных коллекторах // Недропользование. – 2021. – Т. 21, № 2. – С. 76–83. – DOI: 10.15593/2712–8008/2021.2.5.
2. Багринцева К.И. Трещиноватость осадочных пород // Москва: Изд-во Недра. – 1982. – 256 с.
3. Вадецкий Ю.В. Испытание трещинных коллекторов в процессе бурения / Вадецкий Ю.В., Жучков А.А., Макаров Г.М., Окунь Б.И // Москва: Изд-во Недра. – 1973. – 136 с.

4. Гиматудинов Ш.К., Ширковский А.И. Физика нефтяного и газового пласта // Москва: Изд-во Недра. – 1982. – 312 с.
5. Кривощеков С.Н., Кочнев А.А., Равелев К.А. Разработка алгоритма определения технологических параметров нагнетания кислотного состава при обработке призабойной зоны пласта с учетом экономической эффективности // Записки Горного института. – 2021. – Т. 250. – С. 587–595. – DOI: 10.31897/PMI.2021.4.12.
6. Новиков В.А., Мартюшев Д.А. Влияние геолого-технологических параметров на эффективность кислотных обработок в карбонатных коллекторах: экспериментальное и статистическое исследование // Георесурсы. –. – 2024. – Т. 26, № 2. – С. 76–91. – DOI: 10.18599/grs.2024.2.2.
7. Степанов Р.И., Прокатень Е.В. Обзор и оценка применимости методик кислотных обработок призабойных зон сложнопостроенных коллекторов нефтяных и газовых месторождений // Науки о земле и недропользование. –. – 2025. – Т. 48, № 4. – С. 470–485.
8. Хузин Р.А., Хижняк Г.П. Лабораторные исследования влияния концентрации и скорости закачки кислоты на развитие червоточин при пластовых условиях // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2019. – Т. 19, № 4. – С. 356–372. – DOI: 10.15593/2224–9923/2019.4.5.
9. Al-Shargabi M. A Critical Review of Self-Diverting Acid Treatments Applied to Carbonate Oil and Gas Reservoirs / Al-Shargabi M., Davoodi S., Wood D.A., Ali M., Rukavishnikov V.S., Minaev K.M // Petroleum Science. –. – 2023. – Т. 20, № 2. – P. 922–950. – DOI: 10.1016/j.petsci.2022.10.005.
10. Keihani Kamal M. A Comprehensive Analysis of Carbonate Matrix Acidizing Using Viscoelastic Diverting Acid System in a Gas Field / Keihani Kamal M., Mahdavi Kalatehno J., Daneshfar P., Yousefmarzi F // Scientific Reports. –. – 2024. – Т. 14. – Art. 1451. – DOI: 10.1038/s41598-024-52104-5.
11. Ли. Р.Ч., Кан К.Э. Повышение газоотдачи пластов кислотной обработкой в условиях низких пластовых давлений // Геология и минеральные ресурсы. – 2024. – № 6. – С. 103–109.
12. Кан К.Э. Применение спиртокислотных составов для обработки карбонатных коллекторов // Инновационные технологические решения по увеличению добычи углеводородов, повышению эффективности их переработки и роль кластеров в подготовке кадров для нефтегазовой отрасли: материалы меж. науч.-тех. конф. – Ташкент: Изд. «Ilm ziyo zakovat», 2025 – С. 558–559.

References

1. Andreev K.V. [Analysis of Acidizing Fluids Application in High-Temperature Carbonate Reservoirs] // Nedropolzovanie. – 2021. – Vol. 21, No. 2. – P. 76–83. – DOI: 10.15593/2712–8008/2021.2.5. (In Russ.).
2. Bagrinceva K.I. [Fracturing of Sedimentary Rocks] // Moskva: Izd-vo Nedra. – 1982. (In Russ.).

3. [Well Testing of Fractured Reservoirs While Drilling] / Vadeckij Ju.V., Zhuchkov A.A., Makarov G.M., Okun B.I // Moskva: Izd-vo Nedra. – 1973. (In Russ.).
4. Gimatudinov Sh.K., Shirkovskij A.I. [Physics of Oil and Gas Reservoirs] // Moskva: Izd-vo Nedra. – 1982. (In Russ.).
5. Krivoshhekov S.N., Kochnev A.A., Ravelev K.A. [Development of an Algorithm for Determining Technological Acid Injection Parameters in Matrix Acidizing Considering Economic Efficiency] // Zapiski Gornogo instituta. – 2021. – Vol. 250. – P. 587–595. – DOI: 10.31897/PMI.2021.4.12. (In Russ.).
6. Novikov V.A., Martjushev D.A. [Effect of Geological and Technological Parameters on the Efficiency of Acid Treatments in Carbonate Reservoirs: Experimental and Statistical Study] // Georesursy. – 2024. – Vol. 26, No. 2. – P. 76–91. – DOI: 10.18599/grs.2024.2.2. (In Russ.).
7. Stepanov R.I., Prokaten E.V. [Review and Applicability Assessment of Acid Treatment Methods for Bottomhole Formation Zones of Carbonate Complex Reservoirs of Oil and Gas Fields] // Nauki o zemle i nedropolzovanie. – 2025. – Vol. 48, No. 4. – P. 470–485. (In Russ.).
8. Huzin R.A., Hizhnjak G.P. [Laboratory Studies of the Effect of Acid Concentration and Injection Rate on Wormhole Propagation under Reservoir Conditions] // Vestnik PNIPU. Geologija. Neftegazovoe i gornoe delo. – 2019. – Vol. 19, No. 4. – P. 356–372. – DOI: 10.15593/2224–9923/2019.4.5. (In Russ.).
9. Al-Shargabi M. A Critical Review of Self-Diverting Acid Treatments Applied to Carbonate Oil and Gas Reservoirs / Al-Shargabi M., Davoodi S., Wood D.A., Ali M., Rukavishnikov V.S., Minaev K.M // Petroleum Science. – 2023. – Vol. 20, No. 2. – P. 922–950. – DOI: 10.1016/j.petsci.2022.10.005.
10. Keihani Kamal M. A Comprehensive Analysis of Carbonate Matrix Acidizing Using Viscoelastic Diverting Acid System in a Gas Field / Keihani Kamal M., Mahdavi Kalatehno J., Daneshfar P., Yousefmarzi F // Scientific Reports. –. – 2024. – Vol. 14. – Art. 1451. – DOI: 10.1038/s41598-024-52104-5.
11. Li R.Ch., Kan K.E. [Enhanced gas recovery by acidizing under low reservoir pressure conditions] // Geologija i mineral'nye resursy. – 2024. – No. 6. (In Russ.).
12. Kan K.E. [Application of alcohol-acid systems for carbonate reservoir treatment] // Innovacionnye tehnologicheskie reshenija po uvelicheniju dobychi uglevodorodov, povysheniju jeffektivnosti ih pererabotki i rol' klasterov v podgotovke kadrov dlja neftegazovoj otrasli: materialy mezh. nauch.-teh. konf. – 2025. – P. 558–559. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию: 27.09.2026
Статья принята к публикации: 16.10.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 678.744+543.42+543.57

DOI: 10.32743/UniTech.2026.151.10.23567

Морфология, элементный состав и термическое поведение гидролизованного полиакрилонитрила при массовом соотношении ПАН и NaOH 1:8

Очилов Юсуфжон Азамат угли
докторант (PhD)
Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Нуркулов Файзулла Нурмуминович
д-р техн. наук, проф.
Ташкентский научно-исследовательский институт химической технологии
Республика Узбекистан, Ташкент
Ёдгаров Нормухаммад
д-р хим. наук, проф.
Институт общей и неорганической химии
Академия наук Республики Узбекистан
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Абдукаримов Мирзохид Муратович
д-р техн. наук, доц.
Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Закиров Азамжон Алимджанович
д-р техн. наук, проф.
Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Изомов Мирсаид Хикматулло угли
магистрант
Ташкентский государственный технический университет имени Каримова Ислама
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Morphology, elemental composition and thermal behavior of hydrolyzed polyacrylonitrile prepared at a PAN to NaOH mass ratio of 1:8

Ochilov Yusufjon Azamat ugli
PhD student
Islam Karimov Tashkent State Technical University
Uzbekistan, Tashkent

Библиографическое описание: Морфология, элементный состав и термическое поведение гидролизованного полиакрилонитрила при массовом соотношении ПАН и NaOH 1:8 // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Очилов Ю.А.У. [и др.]. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23567

Nurkulov Fayzulla Nurmuminovich
doctor of Technical Sciences, Professor
Tashkent Research Institute of Chemical Technology
Uzbekistan, Tashkent
Yodgarov Normukhammad
doctor of Chemical Sciences, Professor
Institute of General and Inorganic Chemistry of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan
Uzbekistan, Tashkent
Abdukarimov Mirzokhid Muratovich
doctor of Technical Sciences, Associate Professor
Islam Karimov Tashkent State Technical University
Uzbekistan, Tashkent
Zakirov Azamjon Alimdzhanovich
doctor of Technical Sciences, Professor
Islam Karimov Tashkent State Technical University
Uzbekistan, Tashkent
Izomov Mirsaid Hikmatullo
Master's student Islam Karimov Tashkent State Technical University
Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

Цель исследования — охарактеризовать морфологию, элементный состав, спектральные признаки и термическое поведение продукта щелочного гидролиза полиакрилонитрила, полученного при избытке гидроксида натрия. Для анализа применяли гравиметрическое определение сухого остатка, сканирующую электронную микроскопию, энергодисперсионную рентгеновскую спектрометрию, инфракрасную спектроскопию и термогравиметрию. Высушенный продукт характеризуется неоднородной агрегированной морфологией с развитым поверхностным рельефом. Элементный анализ исследованных областей выявил значительное содержание натрия и кислорода наряду с углеродом. ИК-спектральные признаки согласуются с образованием карбоксилатных групп при щелочной обработке ПАН. Термогравиметрические данные показали значительный твёрдый остаток после нагревания и несколько областей потери массы. Сопоставление методов указывает на необходимость учитывать возможный вклад остаточных неорганических соединений в измеряемые характеристики. При этом имеющиеся данные не позволяют количественно определить степень гидролиза, химическую форму всего натрия либо содержание чистой полимерной составляющей. Полученные результаты могут быть использованы при выборе процедур подготовки и контроля состава гидролизованного ПАН перед дальнейшими исследованиями его свойств. Для уточнения природы термического остатка и натрийсодержащих компонентов необходимы дополнительные исследования промытого материала.

Abstract

This study aimed to characterize the morphology, elemental composition, spectroscopic features, and thermal behavior of a polyacrylonitrile product obtained by alkaline hydrolysis with excess sodium hydroxide. Dry-residue determination, scanning electron microscopy, energy-dispersive X-ray spectroscopy, infrared spectroscopy, and thermogravimetric analysis were used.

The dried material exhibited heterogeneous aggregated morphology and a pronounced surface relief. Elemental analysis of the examined regions revealed substantial sodium and oxygen contents together with carbon. Infrared spectral features were consistent with the formation of carboxylate groups during alkaline treatment of polyacrylonitrile. Thermogravimetric measurements showed a substantial solid residue after heating and distinct regions of mass loss. Comparison of the analytical results indicates that residual inorganic compounds may contribute to the measured characteristics of the product. The available evidence does not establish the degree of hydrolysis, the chemical form of all detected sodium, or the amount of pure polymer in the dried residue. Accordingly, the observed high thermal residue should not be interpreted as proof that the original polymer structure remains intact throughout heating. The findings provide useful indicators for selecting sample-preparation and composition-control procedures before further characterization of hydrolyzed polyacrylonitrile. Additional studies of washed material and thermal residues are needed to clarify the contributions of polymeric and inorganic components.

Ключевые слова: гидролизованный полиакрилонитрил, щелочной гидролиз, сухой остаток, сканирующая электронная микроскопия, ЭДС, ИК-спектроскопия, термогравиметрия.

Keywords: hydrolyzed polyacrylonitrile, alkaline hydrolysis, dry residue, scanning electron microscopy, EDS, infrared spectroscopy, thermogravimetry.

Введение

Щелочной гидролиз полиакрилонитрила позволяет изменять химическую природу его функциональных групп. Превращение нитрильных групп с образованием амидных и карбоксилатных фрагментов используется при получении ионообменных волокон и модификации мембран [3, 4]. Свойства продукта зависят не только от протекания реакции, но и от удаления низкомолекулярных веществ после обработки. Поэтому исследование гидролизованного полиакрилонитрила должно учитывать как состояние полимерной составляющей, так и возможное присутствие неорганических компонентов.

В исследованиях ПАН-мембран показано, что продолжительность щелочной обработки влияет на поверхностные функциональные группы и механические свойства [1]. Предварительный гидролиз использовали для получения мембран с улучшенными свойствами при фильтрации белковых растворов [9], а нанофибриллярные прослойки из ГИПАН — для регулирования формирования полиамидного селективного слоя [2]. Эти результаты обосновывают интерес к химической модификации ПАН, но не позволяют переносить характеристики мембран на высушенный продукт без самостоятельных измерений.

Электронная микроскопия описывает морфологию высушенного материала, а ЭДС выявляет элементы в исследуемых областях. Однако элементный состав сам по себе не устанавливает химическую форму натрия или природу кислородсодержащих групп. Количественная интерпретация ЭДС также зависит от геометрии поверхности и условий измерения [5, 6]. ИК-спектроскопия дополняет эти данные сведениями о функциональных

группах, а термогравиметрия показывает изменение массы при нагревании. Такое сопоставление позволяет проверить согласованность отдельных наблюдений и избежать отождествления большого термического остатка с сохранением исходного полимера.

Цель работы — охарактеризовать морфологию, локальный элементный состав, ИК-спектральные признаки и термическое поведение образца ГИПАН, полученного при массовом соотношении исходных реагентов ПАН:NaOH = 1:8, и установить пределы интерпретации этих результатов. Для достижения цели определяли сухой остаток жидкого продукта, описывали морфологию высушенной пробы, сопоставляли локальный элементный состав с ИК-спектром и анализировали температурные области убыли массы.

Материалы и методы

Объект исследования — гидролизованный полиакрилонитрил с лабораторным обозначением «ПАН 1:8». Для получения образца использовали 1 г полиакрилонитрила и 8 г гидроксида натрия. Значение 1:8 относится к массам исходных реагентов и не характеризует массовые доли компонентов готового продукта.

Гидролиз проводили при 90–95 °C в течение 2,5 ч с использованием 100 мл воды.

В качестве исходных реагентов использовали полиакрилонитрильное волокно (ПАН) марки TY, состав — 100 % полиакрилонитрил (Changzhou Tian Yi Engineering Fiber Co., Ltd., Jiangsu, Китай), и гидроксид натрия (NaOH) чистотой ≥99,0 % (Shanghai Huipu Transmission Equipment Co., Ltd., Китай).

Содержание сухого остатка в жидком продукте ГИПАН 1:8 определяли гравиметрически. Пробу массой 20,00 г помещали в предварительно взвешенную чашку массой 44,60 г и высушивали при 90 °C в течение 5 ч. Масса полученного сухого остатка составила 6,04 г, что соответствует 30,2 % от массы исходной жидкой пробы. Полученный сухой остаток использовали для СЭМ, ИК-спектроскопии и ТГА. Приведённое содержание относится к остатку после заданного режима сушки; достижение постоянной массы отдельными повторными взвешиваниями не подтверждено.

Морфологию исследовали методом сканирующей электронной микроскопии. В метаданных указан микроскоп JEOL JSM-IT510. Съёмку выполняли в режиме вторичных электронов (SED), при ускоряющем напряжении 15,0 кВ и высоком вакууме. Рабочее расстояние на микрофотографиях составляет 11,7–12,1 мм. Анализировали семь изображений с увеличениями ×35, ×160, ×200, ×1000, ×2000, ×3000 и ×5000, зарегистрированных 10 июня 2026 г. Масштаб оценивали по линейкам на изображениях. Статистическое распределение размеров частиц не рассчитывали.

Элементный состав оценивали по двум суммарным спектрам картирования и трём локальным спектрам, обозначенным в отчётах как Spectrum 4, Spectrum 5 и Spectrum 6. Использовали массовые доли Wt% и атомные доли Atomic %, приведённые в исходных ЭДС-таблицах. Значения нормированы программой на сумму включённых в расчёт элементов. Отчёты содержат результаты анализа K-серий и отметки об использовании заводских стандартов. Сведения о покрытии образца и материале подложки отсутствуют; это ограничивает интерпретацию абсолютного содержания углерода и лёгких элементов.

ИК-спектр представлен в режиме пропускания (%T). Согласно отчёту, число накоплений составляет 16, спектральное разрешение — 4 $см^{-1}$, функция аподизации — Happ–Genzel. Положения полос считывали по меткам исходного спектра; при интерпретации их округляли до целых $см^{-1}$ с учётом разрешения. Модель спектрометра и способ подготовки пробы в отчёте не указаны.

Термическое поведение изучали по отчёту TA Instruments TRIOS V5.3.0.48151 и соответствующему числовому массиву из 23 178 записей. Массив содержит время, температуру, нормированный тепловой поток, относительную массу и производную массы по температуре. Последняя зарегистрированная температура составляет 787,85 °C. По изменению температуры между 200 и 700 °C средняя фактическая скорость нагрева оценивается как 20,1 °C/мин; это расчётная характеристика записи, а не подтверждённая настройка прибора. Атмосфера, расход газа, модель термоанализатора и тип тигля не приведены. Такие условия существенны для интерпретации термического разложения [8].

Кривую скорости убыли массы строили как −dm/dT, изменив знак экспортированного столбца Deriv. Weight. Повторное сглаживание и численное дифференцирование не применяли. Максимумы определяли по значениям этого столбца в выбранных температурных интервалах. Приведённые результаты относятся к одному термическому измерению; погрешность воспроизводимости и кинетические параметры не определяли.

Результаты и обсуждение

Сухой остаток жидкого продукта

При высушивании 20,00 г жидкой пробы получено 6,04 г остатка: w = (6,04/20,00) × 100 % = 30,2 %. Этот показатель характеризует суммарный остаток после сушки при 90 °C в течение 5 ч. Его нельзя непосредственно считать концентрацией чистого ГИПАН или выходом полимера, поскольку содержание неорганических компонентов отдельно не определяли. Значение 30,2 % также не является остаточной массой в ТГА: в термическом анализе за основу нормирования принята масса уже высушенной пробы.

Морфология поверхности

При увеличении ×35 наблюдаются отдельные частицы и крупные агрегаты неправильной формы с заметными различиями по размеру (рис. 1а). Поверхность частиц неоднородна, их контуры изрезаны. Увеличение ×160 выявляет складчатые и бугристые участки, углубления и локальные разрывы. Изображения ×1000–×5000 показывают, что рельеф крупных образований включает более мелкие округлые выступы и сросшиеся фрагменты (рис. 1б). На снимке ×5000 границы части поверхностных образований различимы, однако отделить первичные частицы от выступов единой структуры по одному изображению нельзя.

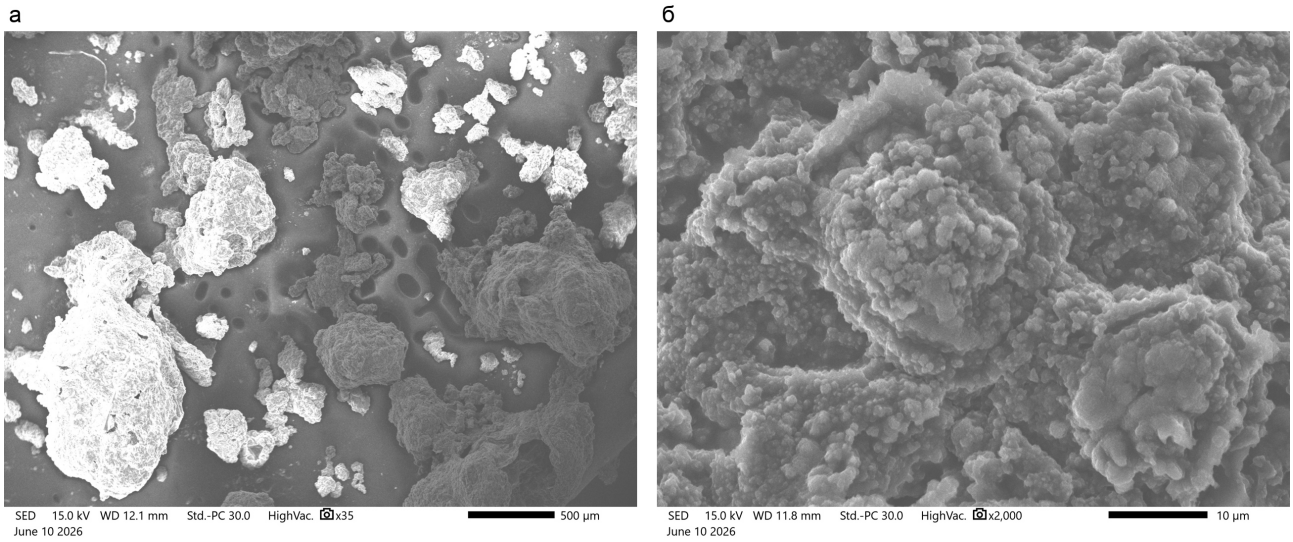


Рисунок 1. СЭМ-изображения ГИПАН: а — ×35, масштаб 500 мкм; б — ×2000, масштаб 10 мкм. Ускоряющее напряжение 15,0 кВ

Наблюдаемую морфологию можно описать как агрегированную, с развитым микрорельефом и открытыми углублениями. Термин «пористость» в количественном смысле к этим изображениям неприменим: они не определяют объём пор, их связность и удельную поверхность. Тёмные области на обзорном снимке, расположенные между частицами, могут принадлежать подложке. Их нельзя учитывать как поры самого ГИПАН. Равным образом различия яркости в режиме SED не доказывают наличие фаз разного химического состава.

Элементный состав и картирование

Во всех пяти ЭДС-отчётах доминируют C, O и Na (табл. 1). Для локальных спектров 4–6 массовая доля Na изменяется от 34,25 до 41,39 %, а C — от 12,76 до 20,76 %. Доля O изменяется в более узком интервале — 44,72–45,86 %. Наиболее натрийсодержащая область соответствует спектру 5; в ней одновременно зарегистрировано наименьшее содержание углерода. Разность между крайними локальными значениями составляет 7,14 процентного пункта для Na и 8,00 процентного пункта для C.

Таблица 1. Нормированный элементный состав по ЭДС, мас. %

Элемент	Карта A	Карта B	Спектр 4	Спектр 5	Спектр 6
C	15,58	19,26	20,76	12,76	19,06
O	46,62	44,82	44,72	45,86	44,84
Na	36,84	35,68	34,25	41,39	35,60
Al	0,47	—	—	—	0,23
Si	0,35	0,24	0,27	—	0,27
S	0,13	—	—	—	—

Примечание. Карта A — суммарный спектр отчёта «map spektr»; карта B — «map_pan18_spektr». Знак «—» означает отсутствие элемента в количественной таблице, а не доказанную нулевую концентрацию. Отклонение суммы от 100 % в пределах 0,01 % обусловлено округлением исходных значений.

Атомное отношение Na/C, рассчитанное по исходным Atomic %, составляет 0,86, 1,70 и 0,98 для спектров 4, 5 и 6 соответственно. Для идеализированного полностью гидролизованного натриевого звена $–CH_2–CH(COONa)–$ это отношение равно 1/3. Прямо определять фазовый состав по данному сравнению нельзя из-за локальности ЭДС и возможных матричных эффектов. Тем не менее повышенное отношение Na/C показывает, что при обсуждении состава нельзя ограничиваться моделью химически чистого полиакрилата натрия.

Натрий может находиться как в карбоксилатных группах, так и в остаточных низкомолекулярных соединениях. При исходной загрузке 8 г NaOH на 1 г ПАН вопрос промывки особенно существенен. ЭДС не различает натриевую соль полимера, свободную щёлочь и другие натрийсодержащие соединения. Азот не включён в представленные количественные таблицы; это не является доказательством полного удаления азота или завершённости гидролиза.

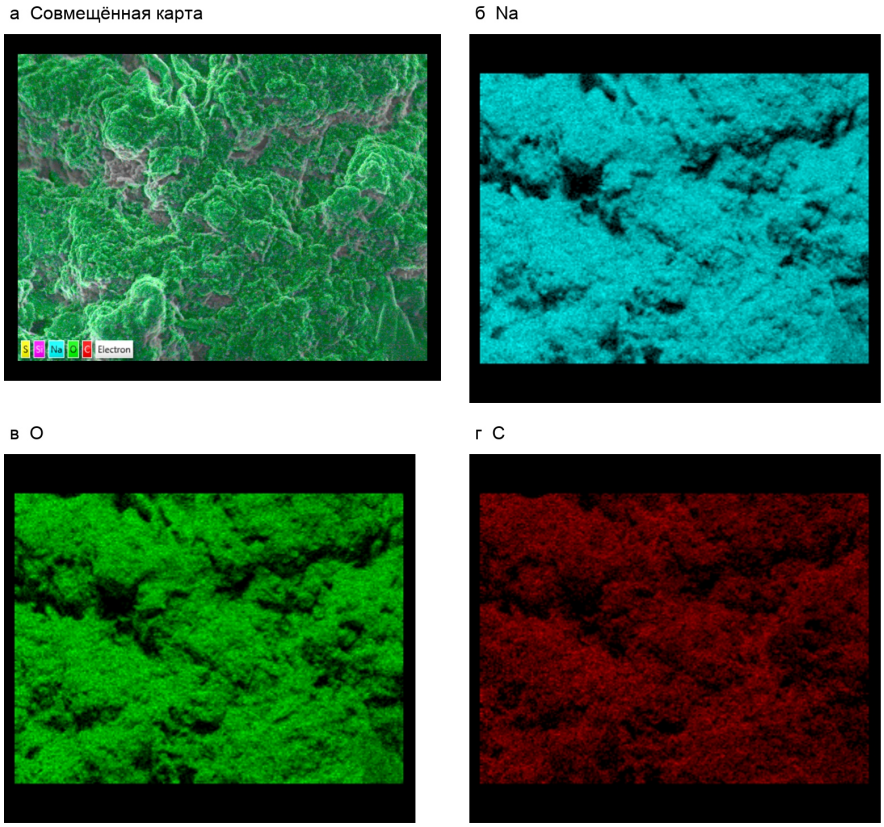


Рисунок 2. Совмещённая карта и карты распределения Na, O и C из отчёта «map_pan18». Цветовые интенсивности разных элементов не являются общей шкалой концентрации

На картах Na и O сигнал охватывает значительную часть исследуемого рельефа (рис. 2). Карта C также содержит сигнал по полю изображения, но имеет иной визуальный контраст. Это качественное наблюдение не позволяет утверждать равномерность состава на молекулярном уровне. На интенсивность карт влияют рельеф, число зарегистрированных импульсов и индивидуальный масштаб отображения. Небольшие количества Al, Si и S в отдельных таблицах требуют проверки, прежде чем относить их к компонентам ГИПАН; источник этих элементов имеющимися данными не установлен. Количественное

картирование требует обработки спектра каждого пикселя с учётом фона, перекрывания пиков и матричных эффектов [7]; цветовое изображение карты само по себе такой расчёт не заменяет.

Инфракрасные спектральные признаки

В ИК-спектре выделяется широкая полоса с минимумом пропускания около 3356 $см^{-1}$ и полоса при 1641 $см^{-1}$ (рис. 3). Их совместное присутствие согласуется с вкладом воды и водородносвязанных O–H-групп. Для области 1641 $см^{-1}$ возможен также вклад амидных структур, поэтому единственное отнесение этой полосы к определённой группе было бы преждевременным.

Полосы при 1543 и 1396 $см^{-1}$ согласуются с асимметричными и симметричными колебаниями карбоксилатных групп. В исследовании щелочно-модифицированных ПАН-мембран соответствующие полосы зарегистрированы при 1563 и 1406 $см^{-1}$ [4]. Близость спектральных областей поддерживает карбоксилатное отнесение для ГИПАН, однако сдвиги и возможное перекрывание полос не позволяют считать его однозначной идентификацией всех функциональных групп.

На предоставленной кривой не выделяется выраженная полоса нитрильных групп в области около 2240 $см^{-1}$. Это согласуется с химическим изменением исходного ПАН, но для определения степени гидролиза нужны спектр исходного полимера, сопоставимая подготовка проб и количественная обработка. Отсутствие отчётливого пика на изображении не эквивалентно отсутствию остаточных нитрильных групп.

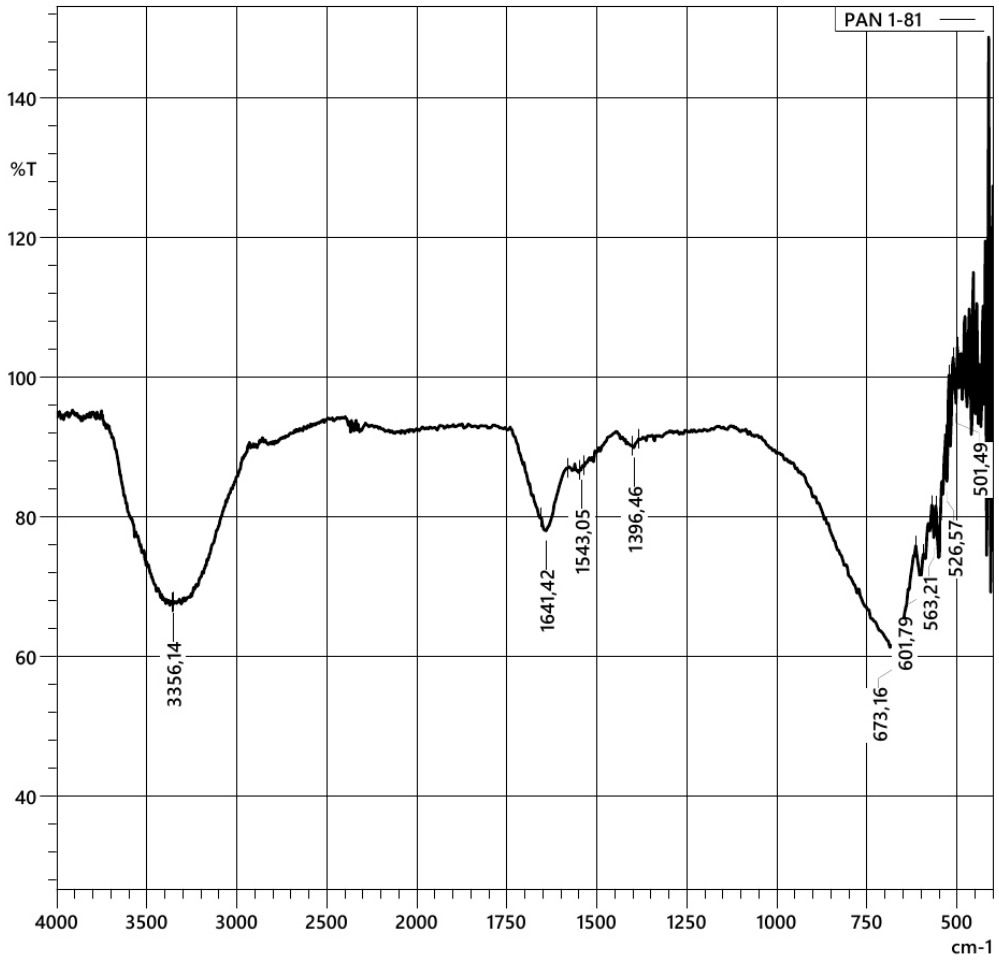


Рисунок 3. Исходный ИК-спектр образца PAN 1 – 8 в режиме пропускания. Спектральное разрешение 4 см$^{-1}$

Метки при 673, 602, 563, 527 и 501 см$^{-1}$ относятся к низкочастотной области, в которой заметно ухудшается качество записи. Вблизи нижней границы диапазона наблюдаются резкие колебания сигнала и выход пропускания выше 100 %. Поэтому отдельным меткам здесь не приписывали конкретные связи или кристаллические фазы. Спектр в целом поддерживает наличие кислородсодержащих групп, но не устанавливает химическую форму всего натрия, обнаруженного методом ЭДС.

Термическое поведение

По числовой записи масса изменяется от 99,991 до 85,407 % при нагревании от начальной области около 26 °C до 787,85 °C. Разность крайних зарегистрированных значений составляет 14,584 процентного пункта. В отчёте TRIOS сумма четырёх выделенных потерь массы равна 14,585 %, а дополнение остатка до 100 % — 14,593 %. Эти близкие значения отражают различие начальной точки отсчёта и округление результатов; в обсуждении суммарную потерю массы принимают приблизительно равной 14,6 %.

Таблица 2. Участки потери массы по отчёту TRIOS

Участок	Потеря, мг	Потеря, %	Метка Peak x, °C
I	0,711	6,994	26,29
II	0,076	0,747	287,68
III	0,580	5,704	460,66
IV	0,116	1,140	762,97

Примечание. Участки воспроизведены по автоматической разметке исходного отчёта. Метки Peak x не отождествляются с независимо установленными температурами отдельных химических реакций. Масса остатка в отчёте — 8,679 мг, или 85,407 %.

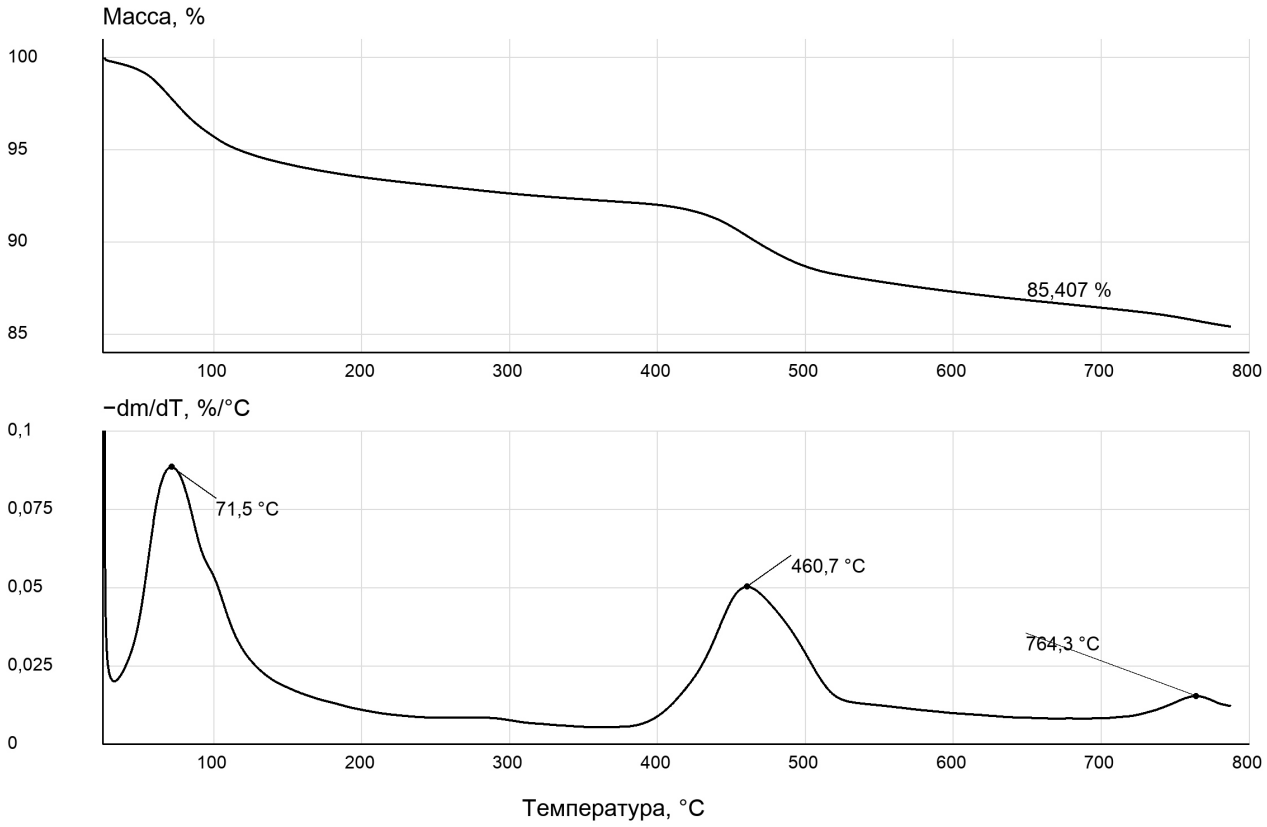


Рисунок 4. Кривые относительной массы и скорости её убыли, построенные по исходному массиву. Для читаемости шкала −dm/dT ограничена 0,10 %/°C; начальное значение 0,233 %/°C выходит за её пределы

После начального переходного участка выраженный низкотемпературный максимум −dm/dT расположен при 71,5 °C и составляет около 0,0884 %/°C. Автоматическая отметка 26,29 °C совпадает с началом записи и не описывает этот максимум. Низкотемпературная убыль массы совместно с полосами около 3356 и 1641 $см^{-1}$ позволяет предполагать вклад удаления воды. Без анализа выделяющихся газов всю потерю первого участка нельзя строго приравнивать к влагосодержанию.

В диапазоне примерно 200–350 °C наблюдается медленная убыль массы. Метка 287,68 °C в исходном отчёте не соответствует выраженному отдельному пику на общей шкале производной. Основной максимум скорости потери массы выше 350 °C по числовому

массиву находится при 460,72 °C, что согласуется с отчётной отметкой 460,66 °C. Значение −dm/dT в этой точке составляет около 0,0502 %/°C. В высокотемпературной области имеется слабый максимум около 764,3 °C; отчётная отметка составляет 762,97 °C.

Потеря массы в области основного высокотемпературного максимума может быть связана с превращениями органической составляющей и кислородсодержащих групп. Однако атмосфера измерения неизвестна, поэтому разделить термоокислительные процессы и разложение в инертной среде невозможно. Кривую теплового потока не использовали для расчёта энтальпии или установления направления тепловых эффектов: в исходных материалах отсутствуют сведения о калибровке, базовой линии и принятом знаке сигнала.

Большой остаток при 787,85 °C показывает сохранение массы твёрдой фазы, но не доказывает термостойкость исходной полимерной структуры до этой температуры. С учётом высокого содержания Na по ЭДС остаток может включать неорганические натрийсодержащие соединения и, в зависимости от атмосферы, углеродистые продукты. Чтобы установить его природу, необходимы анализ остатка и сопоставление промытого и непромытого продукта. В работе по карбоксилированию ПАН-мембран показано влияние образованных при гидролизе групп на последующие термические превращения [10]. Однако условия термического сшивания мембран отличаются от рассматриваемого измерения, поэтому механизм превращений данного образца требует отдельной проверки. Современные исследования также рассматривают щелочную модификацию ПАН-мембран для изменения их поверхностных свойств и функциональности [11].

Сопоставление результатов

ИК-спектральные признаки карбоксилатных групп согласуются с известным направлением щелочного гидролиза ПАН и с присутствием Na и O в ЭДС-спектрах. Вместе с тем высокие локальные отношения Na/C и значительный термический остаток требуют учитывать вклад неорганической составляющей. Разделение этих вкладов важно для дальнейшей оценки свойств ГИПАН: содержание натрия само по себе не определяет число доступных ионообменных центров.

По совокупности данных образец представляет собой неоднородный агрегированный продукт щелочной обработки ПАН с кислородсодержащими группами и значительным содержанием натрия в исследованных областях. Представленных измерений недостаточно для определения степени гидролиза, фазового состава, удельной поверхности или сорбционной ёмкости. Для проверки химической чистоты полезны анализ промывных вод, повторная ЭДС после контролируемой промывки, элементный анализ азота и исследование термического остатка. Эти измерения позволят отличить свойства полимерной составляющей от влияния остаточных реагентов.

Заключение

Образец ГИПАН, полученный при загрузке 1 г ПАН и 8 г NaOH, имеет неоднородную агрегированную морфологию с выраженным поверхностным рельефом. Локальные ЭДС-измерения выявили C, O и Na как основные элементы; содержание Na составляет 34,25–41,39 мас. % в трёх исследованных областях. Эти значения характеризуют локальный нормированный состав и не могут напрямую использоваться как состав всего образца.

Полосы при 1543 и 1396 $см^{-1}$ согласуются с наличием карбоксилатных групп, а широкая полоса около 3356 $см^{-1}$ и сигнал при 1641 $см^{-1}$ допускают вклад воды и других кислородсодержащих структур. ИК-данные поддерживают протекание гидролитического изменения ПАН, но не устанавливают полноту реакции.

При нагревании до 787,85 °C остаточная масса составляет 85,407 %, суммарная потеря — около 14,6 %. Максимумы скорости убыли массы после начального переходного участка наблюдаются около 71,5, 460,7 и 764,3 °C. Высокое содержание натрия и большой термический остаток указывают на необходимость отдельно исследовать возможные остаточные неорганические компоненты. Выводы о сорбционной эффективности и температурном пределе эксплуатации требуют самостоятельных испытаний.

Список литературы

1. Pérez-Álvarez L., Ruiz-Rubio L., Moreno I., Vilas-Vilela J.L. Characterization and Optimization of the Alkaline Hydrolysis of Polyacrylonitrile Membranes // Polymers. – 2019. – T. 11, № 11. – Art. 1843. – DOI: 10.3390/polym11111843.
2. Dai C., Pei T., Liu N., Lin Z., Zhang Q. Hydrolyzed polyacrylonitrile nanofibers as interlayers for ultrathin nanofiltration membranes of high permeance and salt rejection // Journal of Membrane Science. – 2024. – T. 693. – Art. 122398. – DOI: 10.1016/j.memsci.2023.122398.
3. Jassal M., Bhowmick S., Sengupta S., Patra P.K., Walker D.I. Hydrolyzed Poly(acrylonitrile) Electrospun Ion-Exchange Fibers // Environmental Engineering Science. – 2014. – T. 31, № 6. – P. 288–299. – DOI: 10.1089/ees.2013.0436.
4. Kishore Ch, A.A., Bajer B., Schneider E.S., Mantel T., Ernst M., Filiz V., Glass S. Modification of Polyacrylonitrile Ultrafiltration Membranes to Enhance the Adsorption of Cations and Anions // Membranes. – 2022. – T. 12, № 6. – Art. 580. – DOI: 10.3390/membranes12060580.
5. Newbury D.E., Ritchie N.W.M. Electron-Excited X-ray Microanalysis by Energy Dispersive Spectrometry at 50: Analytical Accuracy, Precision, Trace Sensitivity, and Quantitative Compositional Mapping // Microscopy and Microanalysis. – 2019. – T. 25, № 5. – P. 1075–1105. – DOI: 10.1017/S143192761901482X.
6. Newbury D.E., Ritchie N.W.M. Is scanning electron microscopy/energy dispersive X-ray spectrometry (SEM/EDS) quantitative? // Scanning. – 2013. – T. 35, № 3. – P. 141–168. – DOI: 10.1002/sca.21041.
7. Newbury D.E., Ritchie N.W.M. Elemental mapping of microstructures by scanning electron microscopy-energy dispersive X-ray spectrometry (SEM-EDS): extraordinary advances with the silicon drift detector (SDD) // Journal of Analytical Atomic Spectrometry. – 2013. – T. 28, № 7. – P. 973–988. – DOI: 10.1039/C3JA50026H.

8. Vyazovkin S., Chrissafis K., Di Lorenzo M.L., Koga N., Pijolat M., Roduit B., Sbirrazzuoli N., Suñol J.J. 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.
9. Xu D., Pan G., Ge Y., Yang X. Preparation of a Low-Protein-Fouling and High-Protein-Retention Membrane via Novel Pre-Hydrolysis Treatment of Polyacrylonitrile (PAN) // Membranes. – 2023. – T. 13, № 3. – Art. 310. – DOI: 10.3390/membranes13030310.
10. Zhang Y., Wang H., Li L., Zhang X., Dong X., Wang X., Pan Y., Wang T. Effects of polyacrylonitrile carboxylation on pore structure and performance of thermally crosslinked organic solvent nanofiltration membrane // Chemical Engineering Science. – 2024. – T. 287. – Art. 119731. – DOI: 10.1016/j.ces.2024.119731.
11. Zhang L., Kong W., Lan X., Yang N., Jiang B., Zhang L., Wang R. Hydrolysis-induced polyacrylonitrile membranes with high catalytic activity and self-cleaning properties for antibiotic degradation // Journal of Membrane Science. – 2024. – T. 706. – Art. 122958. – DOI: 10.1016/j.memsci.2024.122958.

Статья поступила в редакцию: 17.05.2026
Статья принята к публикации: 13.10.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 620.197.6

Качественная характеристика микрорельефа поверхности эпоксидно-минерального антикоррозионного покрытия методом СЭМ/EDS

Эшкобилов Джамшид Хайитмурод угли
докторант
Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: jamshideshqobilov883@gmail.com

Абдукаримов Мирзохид Муратович
д-р техн. наук (DSc)
доц., Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Ёдгоров Нормахмат
д-р хим. наук, проф.
вед. науч. сотр., Институт общей и неорганической химии Академия наук Республики Узбекистан
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: yodgorov@bk.ru

Qualitative SEM/EDS characterization of the surface morphology of an epoxy-mineral anticorrosive coating

Eshqobilov Jamshid Hayitmurod o‘g‘li
Doctoral student
Tashkent State Technical University named after Islam Karimov
Uzbekistan, Tashkent

Abdukarimov Mirzohid Muratovich
doctor of Technical Sciences (DSc)
Associate Professor Tashkent State Technical University named after Islam Karimov
Uzbekistan, Tashkent

Yodgorov Normakhmat
doctor of Chemical Sciences, Professor
Leading Researcher Institute of General and Inorganic Chemistry
Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan
Uzbekistan, Tashkent

Библиографическое описание: Эшкобилов Д.Х.У., Абдукаримов М.М., Ёдгоров Н. Качественная характеристика микрорельефа поверхности эпоксидно-минерального антикоррозионного покрытия методом СЭМ/EDS // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23556

Аннотация

Цель работы – описать микрорельеф поверхности ранее запатентованного эпоксидно-минерального покрытия (состав 4) и установить пределы интерпретации доступных микроскопических и элементных данных. Состав включает 60 мас.% смеси смол ЭД-20 и каменноугольной (массовое соотношение 1:0,4), 7 мас.% ДТБ-2, 5 мас.% кубовых остатков фурфурилового спирта, 13 мас.% волластонита, 8 мас.% андезитовой муки и 7 мас.% омыленного таллового пека марки Б. Проведен качественный разбор двух поверхностных изображений сканирующей электронной микроскопии (СЭМ; ZEISS, сигнал SE1, 10 кВ, рабочее расстояние 8,5 мм; масштабные метки 200 и 100 мкм) и одного локального спектра энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDS). На изученных участках обнаружен неоднородный многоуровневый рельеф; протяженная открытая сеть трещин в пределах двух полей не прослеживается. Спектр регистрирует C, O, Si, Al, Ca, Fe, Mg, Na, K, Ti, P и Mn. При этом источник Fe, Mn и Ti, в том числе возможный вклад стальной подложки, не установлен. Отсутствие сведений о толщине, поперечных срезах, картировании и параметрах количественной обработки EDS исключает выводы об объемной пористости, равномерности наполнителей и рецептурном составе по спектру. Патентные показатели механических испытаний приведены исключительно для описания объекта без статистического сопоставления. Прямые барьерные измерения не выполнялись; причинная связь морфологии с защитными свойствами не установлена. Результаты представляют локальную качественную характеристику поверхности и определяют задачи дальнейшей экспериментальной проверки.

Abstract

The aim was to describe the surface topography of a previously patented epoxy-mineral coating (formulation 4) and explicitly delimit the interpretation of the available microscopy data. The formulation contained 60 wt.% ED-20 epoxy/coal-tar resin blend (1:0.4 mass ratio), 7 wt.% DTB-2 curing agent, 5 wt.% furfuryl-alcohol production bottoms, 13 wt.% wollastonite, 8 wt.% andesite flour and 7 wt.% grade B saponified tall pitch. Two scanning electron microscopy (SEM) surface images (ZEISS, SE1 signal, 10 kV, 8.5 mm working distance; 200 and 100 μm scale bars) and one local energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) spectrum were qualitatively assessed. The examined areas showed heterogeneous multiscale relief, without an extended network of open cracks visible in these two fields. The local spectrum indicated C, O, Si, Al, Ca, Fe, Mg, Na, K, Ti, P and Mn. The origins of Fe, Mn and Ti, including a potential contribution from the steel substrate, could not be established. In the absence of coating-thickness measurements, cross-sections, elemental maps and documented quantitative EDS processing, the data cannot substantiate bulk porosity, filler homogeneity or nominal formulation fractions. Previously published patent test values are used solely as descriptive background, without statistical comparisons. No direct barrier tests were performed, and no causal structure-performance relationship is claimed. The study provides a limited qualitative surface description and defines priorities for further verification.

Ключевые слова: эпоксидно-минеральное покрытие, микрорельеф поверхности, сканирующая электронная микроскопия (СЭМ), энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия (EDS), волластонит, ограничения метода.

Keywords: epoxy-mineral coating, surface morphology, scanning electron microscopy (SEM), energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS), wollastonite, methodological limitations.

Введение

Коррозионное повреждение стальных трубопроводов и монтажных узлов остается одним из факторов, определяющих долговечность и эксплуатационную надежность нефтегазовой инфраструктуры. Барьерные органические покрытия ограничивают доступ воды, кислорода и растворенных ионов к металлической поверхности, однако их защитная способность определяется одновременно химической стойкостью связующего, сплошностью слоя, адгезией и стабильностью межфазных границ при длительном воздействии среды [7, 8].

Эпоксидные системы широко применяются благодаря высокой адгезии к металлам, механической прочности и возможности химического и дисперсного модифицирования. Наряду с традиционными наполненными системами развиваются самовосстанавливающиеся эпоксидные покрытия и подходы к подбору составов с использованием методов анализа данных [9]. Для обычных наполненных покрытий ключевым остается управление состоянием полимерной матрицы, дисперсностью наполнителя и межфазным контактом, поскольку эти факторы могут влиять как на передачу механических напряжений, так и на пути проникновения коррозионно-активной среды [5, 10, 11, 1].

Волластонит представляет интерес как кальций-силикатный наполнитель с анизотропной морфологией. В эпоксидных композитах его рациональное введение может сопровождаться повышением адгезии, твердости и стойкости материала, тогда как агломерация частиц способна формировать локальные дефекты [2, 6]. Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) и энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия (EDS) позволяют охарактеризовать морфологию поверхности и подтвердить присутствие неорганических элементов, но локальный EDS-спектр не является количественным объемным анализом, а поверхностная микрофотография не заменяет исследование поперечного сечения или оценку пористости [3].

Ранее авторами запатентована композиция на основе ЭД-20, каменноугольной смолы, ДТБ-2, кубовых остатков фурфурилового спирта, волластонита, андезитовой муки и омыленного таллового пека марки Б [4]. Рецептуры и результаты механических испытаний опубликованы в патенте и не являются новым экспериментальным результатом настоящей статьи. Здесь впервые в пределах предоставленного массива описываются два поверхностных СЭМ-поля и один локальный EDS-спектр выбранного состава. Изучение поверхности само по себе не позволяет установить причинную связь между строением слоя и антикоррозионной эффективностью.

Цель работы - выполнить качественное описание микрорельефа и локального элементного сигнала поверхности состава 4, отдельно разграничив непосредственно наблюдаемые признаки, справочные патентные показатели и гипотезы, требующие независимой проверки. Задачи: документировать доступные параметры СЭМ/EDS; описать два поля без экстраполяции на весь объем; проанализировать пределы интерпретации EDS с учетом возможного вклада подложки; обозначить необходимые дополнительные опыты. Сравнение микроструктуры четырех рецептур, оценка объемной пористости и проверка барьерного механизма в задачи работы не входят.

Материалы и методы

Объект исследования и рецептурные данные

Объектом микроструктурного исследования служила ранее разработанная композиция, защищенная патентом Республики Узбекистан UZ IAP 8558 [4]. Во всех четырех вариантах суммарная массовая доля смеси эпоксидно-диановой смолы ЭД-20 и каменноугольной смолы составляла 60 мас.%, при этом изменялись массовое соотношение смол и содержание ДТБ-2, кубовых остатков фурфурилового спирта, андезитовой муки, волластонита и омыленного таллового пека марки Б. Для устранения неоднозначности общее содержание смеси смол и соотношение ЭД-20: каменноугольная смола в таблице 1 приведены отдельными строками.

Таблица 1. Рецептурные данные четырех составов по патенту UZ IAP 8558 [4]

Компонент / параметр	Состав 1	Состав 2	Состав 3	Состав 4
Общее содержание смеси ЭД-20 + каменноугольная смола, мас.%	60	60	60	60
Массовое соотношение ЭД-20 : каменноугольная смола	1:0,7	1:0,6	1:0,5	1:0,4
Отвердитель ДТБ-2, мас.%	10	9	8	7
Кубовые остатки фурфурилового спирта, мас.%	8	8	8	5
Андезитовая мука, мас.%	7	6	7	8
Волластонит, мас.%	8	9	9	13
Омыленный талловый пек марки Б, мас.%	7	8	8	7

Получение и нанесение покрытия

Согласно патентному описанию [4], расчетное количество смеси ЭД-20 и каменноугольной смолы загружали в двухшнековый смесительный узел, нагревали до 80 °C и перемешивали 1 мин при частоте вращения до 150 об/мин и рабочем давлении до 100 бар. После охлаждения до 50 °C небольшими порциями вводили кубовые остатки фурфурилового спирта, андезитовую муку, волластонит и омыленный талловый пек марки Б; смесь дополнительно перемешивали 5 мин до однородного состояния, после чего непосредственно перед нанесением вводили ДТБ-2.

Покрытия формировали на предварительно подготовленной стальной поверхности, обработанной грунтом-праймером, методом безвоздушного распыления с применением двухкомпонентного аппарата высокого давления WIWA [4]. Отверждение осуществлялось по схеме холодного отверждения. В патентном описании и в доступном массиве данных не указаны марка стали, толщина сухого слоя, число параллельных образцов и статистические характеристики разброса; эти параметры в настоящей статье не реконструируются и не заменяются предположительными значениями.

Физико-механические данные

Численные значения таблицы 2 взяты исключительно из патента [4] и не являются результатами новых испытаний. Описание испытания адгезии соответствует методу отрыва (семейство ISO 4624 / ГОСТ 32299), однако редакция и год стандарта, реально

применявшиеся при получении этих чисел, не подтверждены первичным протоколом. ГОСТ 32299-2025 (ISO 4624:2023) введён в действие в Российской Федерации 01.08.2025; это не позволяет ретроспективно приписать его патентным измерениям. Другие приведённые в источнике обозначения - ГОСТ Р 51164-98, ГОСТ 9.602 и ГОСТ 25812 - не имеют однозначной построчной привязки. Поэтому стандарт для каждого из остальных показателей отмечен как неустановленный. Число повторностей, вариабельность и доверительные интервалы не опубликованы; статистические выводы не выполнялись.

Таблица 2. Ранее опубликованные физико-механические показатели четырех составов

Показатель	Состав 1	Состав 2	Состав 3	Состав 4	Нормативный метод / статус атрибуции
Адгезия к стали методом отрыва, МПа	12,4	12,9	13,0	14,5	Метод отрыва (ISO 4624 / ГОСТ 32299); год редакции не подтверждён
Снижение адгезии после 1000 ч в воде, %	12,0	13,0	12,0	11,0	- (по первичному источнику не установлен)
Катодное отслаивание после 30 суток в 3% NaCl, см²	1,56	1,78	1,56	1,20	- (по первичному источнику не установлен)
Пенетрация при (20±3) °C, мм	0,10	0,09	0,09	0,07	- (по первичному источнику не установлен)
Прочность при разрыве, МПа	39,1	40,4	40,2	42,1	- (по первичному источнику не установлен)

Примечание. Значения взяты из патента [4] без повторностей, стандартных отклонений и доверительных интервалов. Для адгезии указан метод отрыва по семейству ГОСТ 32299 / ISO 4624; точная редакция применённого стандарта не подтверждена протоколом. Для остальных показателей построчная атрибуция стандартов по первоисточнику неустановима. Знак «-» в графе «Стандарт» означает отсутствие подтверждённой привязки, а не отсутствие стандартизованных методов.

Сканирующая электронная микроскопия и EDS-анализ

Два изображения поверхности состава 4 получены на оборудовании производителя ZEISS (Photo No. 7816 и 7817) в режиме регистрации вторичных электронов SE1 при ускоряющем напряжении 10,00 кВ и рабочем расстоянии 8,5 мм; нанесенные масштабные метки - 200 и 100 мкм. Модель прибора, способ пробоподготовки, применение и материал проводящего напыления, числовое увеличение и критерии выбора полей в переданном протоколе отсутствуют. Выбор двух доступных кадров носит документальный, а не случайный или статистически репрезентативный характер. Один локальный EDS-спектр («Спектр 18») рассматривается только как регистрация элементных линий; координаты/ критерий выбора участка, время накопления, единицы и алгоритм нормировки неизвестны. Таким образом, метод нельзя воспроизвести во всех деталях по имеющемуся описанию, что прямо ограничивает интерпретацию.

Таблица 3. Доступные параметры СЭМ/EDS и ограничения воспроизводимости

Параметр	Сведения в доступном экспериментальном массиве
Производитель СЭМ	ZEISS
Модель микроскопа	Не указана в доступном протоколе; не реконструировалась
Режим регистрации	SE1, вторичные электроны
Ускоряющее напряжение	EHT = 10,00 kV
Рабочее расстояние	WD = 8,5 mm
Число анализируемых СЭМ-полей	2 поля поверхности: Photo No. 7816 и 7817
Масштабные метки	200 и 100 мкм; числовое увеличение не зафиксировано (по меткам не реконструируется)
Подготовка образца	Не документирована в доступном протоколе
Проводящий слой	Наличие/отсутствие и материал не документированы
EDS-анализ	Один локальный спектр «Спектр 18»
Выбор точки EDS и время накопления	Критерии выбора участка и время накопления не документированы
Единицы/алгоритм нормировки EDS	Не указаны; численные значения не трактуются как объемный количественный состав
EDS-картирование Ca/Si/Al/Fe	В доступном массиве отсутствует; пространственное распределение и агломерация количественно не оцениваются
Поперечный срез, фрактография, толщина покрытия	В доступном массиве отсутствуют; статья ограничена поверхностной морфологией

На исходном снимке EDS приведены подписи SiO_2, Al_2O_3, Fe, CaO, MgO, Na_2O, K_2O, TiO_2, P_2O_5 и MnO. Они представляют приборную форму вывода условных оксидных эквивалентов наряду с обозначением Fe как элемента; такой смешанный формат нельзя трактовать как химическую спецификацию фаз. Исходные единицы, способ пересчета элементов в оксиды, нормировка и учет C и O не документированы. Поэтому численные значения с рисунка 3 сознательно не перенесены в таблицу массовых долей и не используются для проверки рецептуры; обсуждаются только идентифицированные элементные линии. Для количественной оценки нужны первичные файлы спектра, параметры калибровки и дополнительные независимые измерения.

Результаты и обсуждение

Выбор состава для микроструктурного исследования

Состав 4 выбран для описания поверхности потому, что его справочные патентные значения составляют: адгезия отрывом 14,5 МПа, снижение адгезии после 1000 ч выдержки в воде 11 %, площадь катодного отслаивания после 30 суток в 3 %-ном NaCl 1,20 см², пенетрация 0,07 мм и прочность при разрыве 42,1 МПа [4]. Это отдельные опубликованные значения без информации о повторяемости. Выбор состава не означает доказанного превосходства по свойствам и не означает, что наблюдаемый поверхностный рельеф является причиной указанных чисел.

Для составов 1-3 изображения СЭМ и карты EDS отсутствуют. Следовательно, сравнение их микроструктуры с составом 4, равно как и оценка изменения распределения наполнителя при переходе между рецептурами, невозможно. Даже номинальные различия патентных показателей нельзя признать статистически значимыми без серии испытаний и параметров разброса. В дальнейшем требуются одинаковый протокол съемки и независимые поля каждого состава.

Морфология поверхности

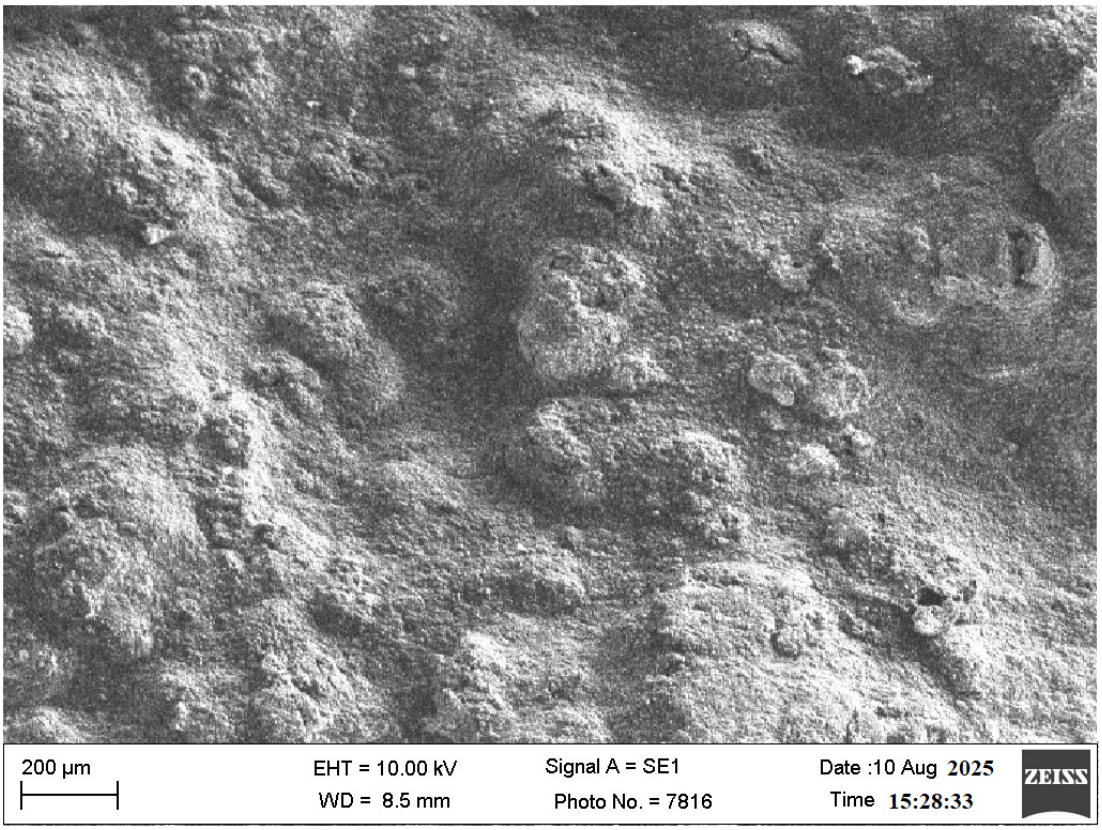


Рисунок 1. Поверхность состава 4: СЭМ, SE1, EHT 10 кВ, WD 8,5 мм, поле Photo No. 7816; масштабная метка 200 мкм

На СЭМ-кадре с масштабной меткой 200 мкм наблюдается выраженный многоуровневый рельеф: участки визуально непрерывной матрицы чередуются с выступающими образованиями неправильной формы размером от десятков до первых сотен микрометров. Такая гетерогенность ожидаема для органо-минеральной композиции, содержащей полимерное связующее, андезитовую муку и волластонит. Термин «плотная структура» для всего объема покрытия по этому изображению не используется, поскольку поверхностный кадр не дает количественной информации о внутренней пористости и сквозных дефектах.

В данном поле не прослеживается развитая сеть протяженных открытых трещин. Это является непосредственно наблюдаемым признаком только для показанного участка поверхности. Отсутствие видимой трещинной сети не эквивалентно доказательству сплошности покрытия по всей толщине и не позволяет количественно оценить проницаемость. Для такого вывода требуются поперечные шлифы, измерение толщины и пористости, а также электрохимические или сорбционные методы.

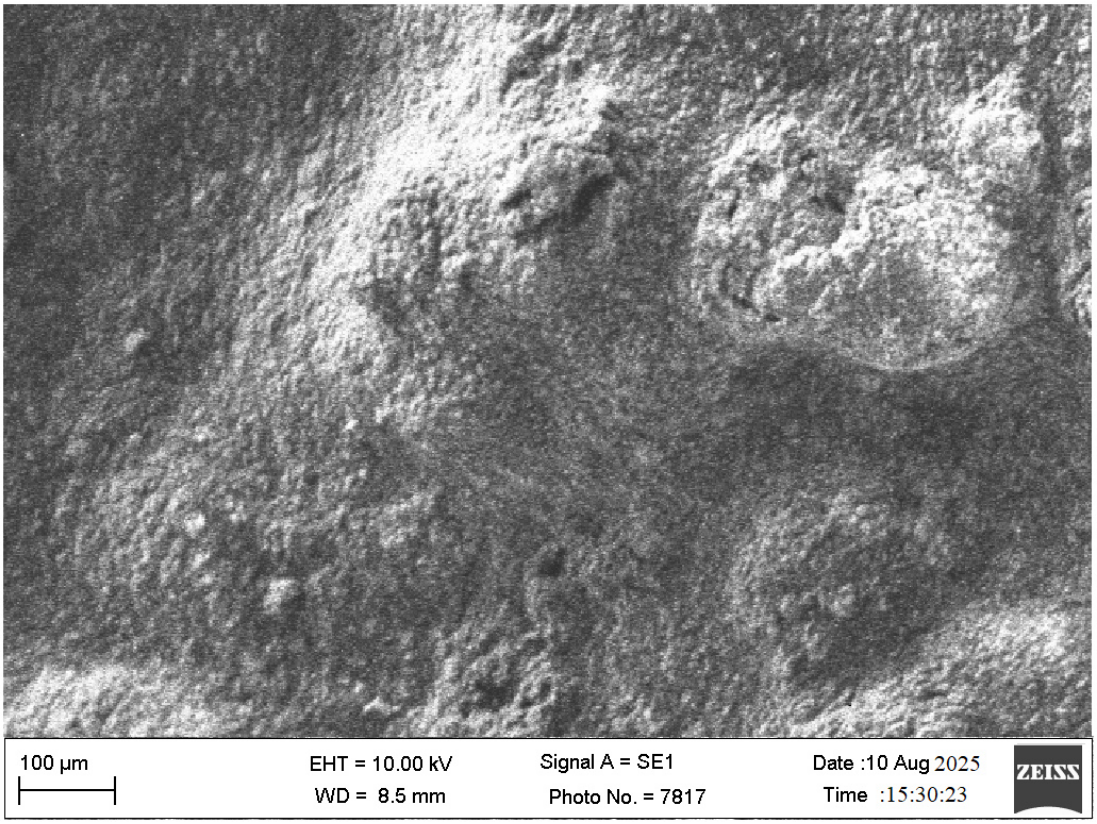


Рисунок 2. Поверхность состава 4: СЭМ, SE1, EHT 10 кВ, WD 8,5 мм, поле Photo No. 7817; масштабная метка 100 мкм

На кадре с масштабной меткой 100 мкм более отчетливо видны контакты рельефных включений с окружающей матрицей. В большинстве наблюдаемых участков не формируются сплошные кольцевые зазоры вокруг крупных включений, однако по одной поверхностной микрофотографии нельзя количественно оценить прочность межфазного сцепления или наличие дефектов в глубине слоя. Для этого необходимы поперечные срезы и/или фрактография; такие данные в доступном экспериментальном массиве отсутствуют.

Игольчатая морфология отдельных частиц волластонита на представленных кадрах не разрешается настолько однозначно, чтобы приписывать конкретные выступы $CaSiO_3$. Поэтому волластонит обсуждается только с учетом рецептуры и регистрации Ca и Si в локальном EDS-спектре. Подобная осторожность необходима, поскольку литературные данные показывают зависимость эффекта волластонита от дисперсности и межфазного контакта [2, 6], а эти параметры непосредственно в данной работе не измерялись.

Локальный элементный состав по данным EDS

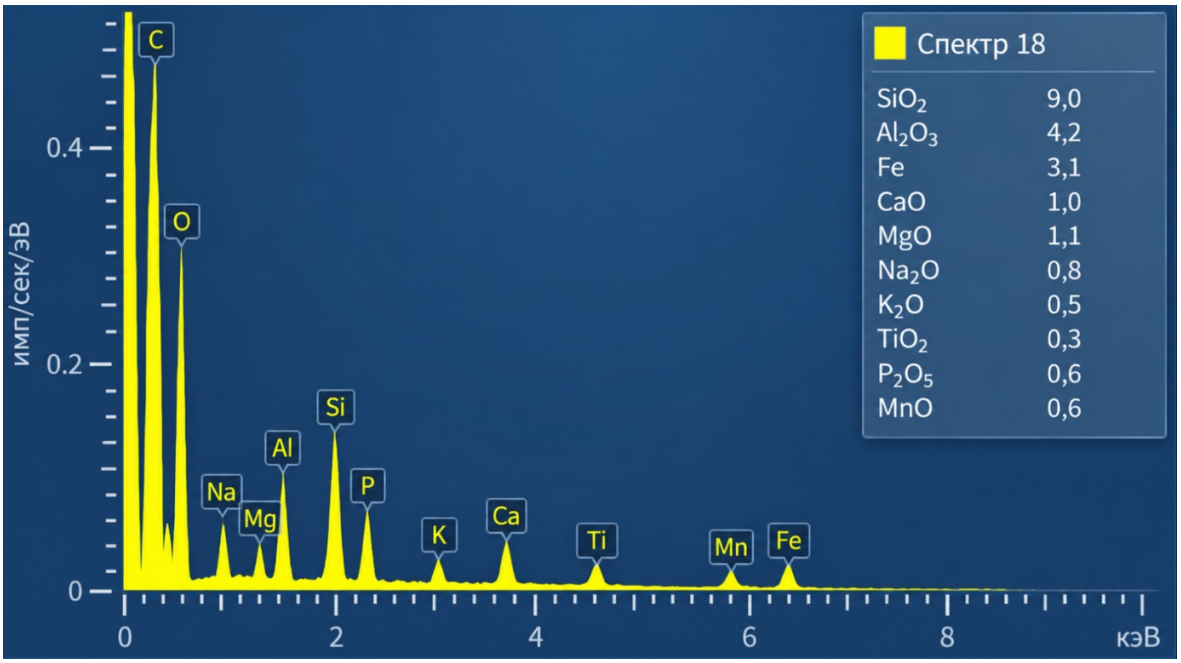


Рисунок 3. Локальный EDS-спектр («Спектр 18»). Подписи оксидов в приборной вставке не представляют подтверждённый фазовый или массовый состав; единицы и нормировка не документированы

В локальном спектре наблюдаются интенсивные линии C и O, а также линии Si, Al, Na, Mg, P, K, Ca, Ti, Mn и Fe. Их совместная регистрация согласуется с органо-минеральной природой анализируемого микрообъёма. По единственному спектру нельзя установить пространственную неоднородность, массовые доли компонентов, распределение наполнителя или степень его агломерации.

Сочетание зарегистрированных Si, Al, Na, K и Mg согласуется с возможным присутствием силикатных и алюмосиликатных компонентов, а Ca и Si - с рецептурным волластонитом. Однако EDS не идентифицирует кристаллические фазы и не доказывает, какой именно частице принадлежат эти сигналы. Источник Fe, Mn и Ti неопределен: возможны составляющие минеральных компонентов, загрязнение либо вклад стальной подложки/межфазной области. Из-за неизвестной толщины покрытия и глубины генерации рентгеновского сигнала при 10 кВ исключить подложку невозможно. Для разрешения вопроса нужны поперечный срез, измерение толщины и локальное картирование с контролем сигналов подложки.

EDS-картирование часто используют для оценки пространственного распределения наполнителя и выявления зон агломерации [3]. Для исследуемой композиции карты Ca, Si, Al и Fe в доступном наборе данных отсутствуют, поэтому пространственная однородность наполнителей в настоящей статье не оценивается. Методически обоснованным следующим этапом является картирование нескольких независимых участков совместно с анализом поперечного сечения; это позволит отделить сигналы наполнителя от возможного вклада подложки и перейти от локальной идентификации элементов к оценке их распределения.

Сопоставление с патентными показателями: пределы допустимых выводов

Два СЭМ-поля описывают только локальную поверхность, а патентные значения характеризуют ранее испытанные образцы; связь каждого показателя с конкретным наблюдаемым участком не проверялась. Без сопоставимых серий образцов, повторных измерений, поперечных срезов и независимых барьерных испытаний причинную зависимость «микрорельеф - адгезия - защитные свойства» установить нельзя. Повышение извилистости пути диффузии в наполненных полимерных материалах рассматривается в литературе как возможная модель [5, 11]. Для представленного покрытия «лабиринтный» барьерный механизм экспериментально не подтверждён.

Справочное патентное значение адгезии 14,5 МПа и указанное снижение на 11 % после 1000 ч выдержки в воде [4] не позволяют оценить статистическую воспроизводимость и не являются прямым измерением проницаемости слоя. Наблюдаемое отсутствие протяженной трещинной сети в двух полях не противоречит сохранению адгезии в опубликованном испытании, однако не подтверждает физическую причину этого результата. Необходимы испытания на одной серии образцов и оценка изменчивости.

Аналогично точечное значение прочности при разрыве 42,1 МПа не доказывает передачу напряжений волластонитовым наполнителем. Из литературных работ известно, что дисперсность и межфазное взаимодействие могут сказываться на свойствах эпоксидных композитов [2, 6, 10], но в настоящем исследовании эти параметры не измерены. Прямые испытания барьерности - электрохимическая импедансная спектроскопия (EIS), сорбция воды, диффузия электролита и проницаемость - отсутствуют. Следовательно, ни преимущество состава 4, ни конкретный антикоррозионный механизм на основании СЭМ/EDS не устанавливаются.

Ограничения и границы интерпретации

Набор первичных данных состоит из двух нерепрезентативных поверхностных СЭМ-полей и одного локального EDS-спектра. Не документированы модель микроскопа, пробоподготовка, покрытие проводящим слоем, числовое увеличение, выбор полей и точки, время накопления и нормировка EDS. Нет карты распределения элементов, поперечного среза, фрактографии, толщины, количественной пористости и сведений о глубине взаимодействия пучка. Поэтому нельзя проверить массовые доли рецептуры, идентифицировать конкретные минеральные частицы, оценить агломерацию, трехмерную сплошность или исключить вклад стальной подложки в Fe, Mn и Ti. Патентные значения механических показателей не имеют доступной статистики, а EIS, водопоглощение и проницаемость не измерены. Для устранения указанных неопределенностей необходимы повторные снимки нескольких образцов всех рецептур, поперечные шлифы, толщинометрия и порометрия, EDS-картирование Ca/Si/Al/Fe/Mn/Ti с полным протоколом, а также реплицированные механические и независимые барьерные испытания. До их выполнения выводы ограничиваются непосредственно зарегистрированными поверхностными признаками.

Заключение

На двух СЭМ-изображениях поверхности запатентованного состава 4 (масштабные метки 200 и 100 мкм) зафиксирован неоднородный многоуровневый рельеф; протяженная открытая сеть трещин в изученных полях визуально не выявлена. Эти наблюдения не позволяют делать выводы о сквозных дефектах, плотности и пористости всего слоя.

Один локальный EDS-спектр показывает линии C, O, Si, Al, Ca, Fe, Mg, Na, K, Ti, P и Mn. Неизвестные параметры количественной обработки и отсутствие элементных карт исключают оценку массовых долей и пространственной однородности. Источники Fe, Mn и Ti не разграничены между наполнителем и возможным вкладом подложки.

Справочные патентные физико-механические показатели не связаны экспериментально с представленной морфологией; статистическое превосходство состава 4 и «лабиринтный» барьерный механизм не доказаны. Следующий этап - полноценный документированный СЭМ/EDS-анализ серии образцов и поперечных срезов в сочетании с измерениями толщины, пористости, EIS, водопоглощения и повторными механическими испытаниями.

Практическое значение полученных наблюдений состоит в документировании двух характерных поверхностных участков выбранной рецептуры и постановке проверяемых задач для дальнейших исследований. Достоверность защитной эффективности и воспроизводимость наблюдаемой морфологии могут быть оценены только после независимых испытаний; в настоящей работе такие выводы не заявляются.

Список литературы

1. Шайкулов, Б.К. Исследование сополимера акрил-стирол-уретан / Б.К. Шайкулов, Ф.Н. Нуркулов, А.Т. Джалилов // Universum. – 2022. – С. 33–37.
2. Мишагин, К.А. Эпоксидные материалы, наполненные синтетическим волластонитом на основе цеолитсодержащей кремнистой породы / К.А. Мишагин, Е.М. Готлиб, А.Р. Валеева, Е.С. Ямалеева // Труды ВИАМ. – 2026. – № 2 (156). – С. 107–116. – DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-2-107-116.
3. Самарджия М., Стоянович И. Вукович Домановац М., Алар В. Samardžija M., Stojanović I., Vuković Domanovac M., Alar V. Epoxy Coating Modification with Metal Nanoparticles to Improve the Anticorrosion, Migration, and Antibacterial Properties // Coatings. – 2023. – Т. 13, № 7. – Art. 1201. – DOI: 10.3390/coatings13071201.
4. Эшкобилов, Дж. Х. угли. Полимерная композиция для получения коррозионностойкого покрытия: патент Респ. Узбекистан UZ IAP 8558 / Дж. Х. угли Эшкобилов, М.М. Абдукаримов, Н. Ёдгоров, Ф.Н. Нуркулов. – Заявл. 21.05.2026; опубл. 25.06.2026, Бюл. № 6 (302).
5. Anwar S., Li X. A review of high-quality epoxy resins for corrosion-resistant applications // Journal of Coatings Technology and Research. – 2024. – Т. 21, № 2. – P. 461–480. – DOI: 10.1007/s11998-023-00865-5.
6. Dordane R., Doroodmand M.M. Novel method for scalable synthesis of wollastonite nanoparticle as nano-filler in composites for promotion of anti-corrosive property // Scientific Reports. – 2021. – Т. 11. – Art. 2579. – DOI: 10.1038/s41598-021-81875-4.

7. Farh H.M.H., Ben Seghier M.E.A., Zayed T. A comprehensive review of corrosion protection and control techniques for metallic pipelines // Engineering Failure Analysis. – 2023. – T. 143. – Art. 106885. – DOI: 10.1016/j.engfailanal.2022.106885.
8. Jomy J., Prabhu D., Prabhu P.R. Inhibitors Incorporated Into Water-Based Epoxy Coatings on Metals for Corrosion Protection: A Review // Journal of Bio- and Tribo-Corrosion. – 2022. – T. 8. – DOI: 10.1007/s40735-022-00643-7.
9. Liu T., Chen Z., Yang J., Ma L., Mol A., Zhang D. Machine learning assisted discovery of high-efficiency self-healing epoxy coating for corrosion protection // npj Materials Degradation. – 2024. – T. 8. – DOI: 10.1038/s41529-024-00427-z.
10. Patil H.A., Maske V.A., More A.P. Synthesis and Characterization of Eco-Friendly Epoxy Resins and Novel Fillers for Enhanced Corrosion Protection of Mild Steel // Polymers for Advanced Technologies. – 2024. – T. 35, № 12. – DOI: 10.1002/pat.70027.
11. Verma C., Rhee K.Y., Alfantazi A. Functionalized epoxy resins for enhanced interface properties and corrosion resistance: Tailoring of surface and interface properties and performance // Applied Surface Science Advances. – 2025. – T. 25. – Art. 100685. – DOI: 10.1016/j.apsadv. 2024.100685.

References

1. Shaykulov B.K., Nurkulov F.N., Jalilov A.T. Investigation of the acrylic-styrene-urethane copolymer // Universum journal. – 2022. – No. 8 (98). – P. 33–37.
2. Mishagin K.A., Gotlieb E.M., Valeeva A.R., Yamaleeva E.S. Epoxy materials filled with synthetic wollastonite based on zeolite-containing siliceous rock // Proceedings of VIAM. – 2026. – No. 2 (156). – P. 107–116. – DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-2-107-116.
3. Samardžija M., Stojanović I., Vuković Domanovac M., Alar V. Samardžija M., Stojanović I., Vuković Domanovac M., Alar V. Epoxy Coating Modification with Metal Nanoparticles to Improve the Anticorrosion, Migration, and Antibacterial Properties // Coatings. – 2023. – Vol. 13, No. 7. – Art. 1201. – DOI: 10.3390/coatings13071201.
4. Eshqobilov J.H. o‘g‘li, Abdukarimov M.M., Yodgorov N., Nurqulov F.N. Polymer composition for producing a corrosion-resistant coating. Patent of the Republic of Uzbekistan UZ IAP 8558. – Registered 21 May 2026; published 25 June 2026, Bulletin No. 6(302).
5. Anwar S., Li X. A review of high-quality epoxy resins for corrosion-resistant applications // Journal of Coatings Technology and Research. – 2024. – Vol. 21, No. 2. – P. 461–480. – DOI: 10.1007/s11998-023-00865-5.
6. Dordane R., Doroodmand M.M. Novel method for scalable synthesis of wollastonite nanoparticle as nano-filler in composites for promotion of anti-corrosive property // Scientific Reports. – 2021. – Vol. 11. – Art. 2579. – DOI: 10.1038/s41598-021-81875-4.
7. Farh H.M.H., Ben Seghier M.E.A., Zayed T. A comprehensive review of corrosion protection and control techniques for metallic pipelines // Engineering Failure Analysis. – 2023. – Vol. 143. – Art. 106885. – DOI: 10.1016/j.engfailanal.2022.106885.

8. Jomy J., Prabhu D., Prabhu P.R. Inhibitors Incorporated Into Water-Based Epoxy Coatings on Metals for Corrosion Protection: A Review // Journal of Bio- and Tribo-Corrosion. – 2022. – Vol. 8. – DOI: 10.1007/s40735-022-00643-7.
9. Liu T., Chen Z., Yang J., Ma L., Mol A., Zhang D. Machine learning assisted discovery of high-efficiency self-healing epoxy coating for corrosion protection // npj Materials Degradation. – 2024. – Vol. 8. – DOI: 10.1038/s41529-024-00427-z.
10. Patil H.A., Maske V.A., More A.P. Synthesis and Characterization of Eco-Friendly Epoxy Resins and Novel Fillers for Enhanced Corrosion Protection of Mild Steel // Polymers for Advanced Technologies. – 2024. – Vol. 35, No. 12. – DOI: 10.1002/pat.70027.
11. Verma C., Rhee K.Y., Alfantazi A. Functionalized epoxy resins for enhanced interface properties and corrosion resistance: Tailoring of surface and interface properties and performance // Applied Surface Science Advances. – 2025. – Vol. 25. – Art. 100685. – DOI: 10.1016/j.apsadv.2024.100685.

Статья поступила в редакцию: 11.08.2026
Статья принята к публикации: 28.08.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 621.039.59

DOI: 10.32743/UniTech.2026.151.10.23351

Влияния магнитного поля и скорости потока нефти на образование отложений на поверхности теплообмена

Юсупов Рустам Атхамович
д-р филос. техн. наук (PhD), соискатель
Ташкентский химико-технологический институт
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: kotlonadzor@scizs.uz

Исаматова Джамиля Нигматуллаевна
д-р филос. техн. наук (PhD), начальник
E-mail: jamilyechka@mail.ru

Исмаилов Ойбек Юлибаевич
д-р техн. наук
вед. науч. сотр. институт общей и неорганической химии АН РУз
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: ismoilovntmpi@mail.ru

Саттаров Зафар Муродович
канд. техн. наук, проф.
Ташкентский архитектурно-строительный университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Библиографическое описание: Влияния магнитного поля и скорости потока нефти на образование отложений на поверхности теплообмена // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Юсупов Р.А. [и др.]. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23351

The influence of magnetic field and oil flow speed on the formation of deposits on the heat exchange surface

Yusupov Rustam
doctor of Philosophy of Engineering Sciences (PhD)
Applicant at the Tashkent Institute of Chemical Technology
Uzbekistan, Tashkent
Isamatova Djamila
doctor of Philosophy of Technical Sciences (PhD)
Head of the Department of Quality Control of Education at Gubkin Russian State University of Oil and Gas (SRU) in Tashkent
Uzbekistan, Tashkent
Ismailov Oybek
doctor of Technical Sciences, Senior Researcher
at the Institute of General and Inorganic Chemistry of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan; Uzbekistan, Tashkent
Sattorov Zafar
candidate of Technical Sciences, Professor
Tashkent University of Architecture and Civil Engineering
Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

В работе исследовано влияние постоянного магнитного поля на интенсивность образования отложений на внутренней поверхности теплообменной трубы при термической обработке нефтяного сырья. Экспериментальные исследования проводились на лабораторной установке при температуре горячего теплоносителя 120 °C, давлении 200 кПа и начальной температуре нефтяного потока 20 °C. Скорость потока изменялась от 0,396 до 1,59 м/с, а продолжительность эксперимента составляла до 200 ч.

Полученные результаты показали существенное снижение массы отложений при использовании магнитной обработки. При скорости потока 0,396 м/с и времени 200 ч масса отложений уменьшилась с 0,884 г при традиционном нагревании до 0,0191 г при воздействии магнитного поля, что соответствует сокращению в 46,28 раза. При скорости 0,79 м/с масса отложений составила соответственно 0,693 и 0,0184 г, а сокращение достигло 37,66 раза. При скорости 1,19 м/с данные показатели составили 0,480 и 0,0131 г, сокращение — 36,64 раза. При максимальной скорости 1,59 м/с масса отложений снизилась с 0,321 до 0,0089 г, то есть в 36,06 раза.

Таким образом, постоянное магнитное поле обеспечивает значительное снижение интенсивности образования отложений во всём исследованном диапазоне режимов. Наибольшая эффективность наблюдается при длительном времени работы и низкой скорости потока. Магнитная обработка может быть рекомендована как эффективный безреагентный способ защиты теплообменных поверхностей от образования отложений.

Abstract

The study investigates the effect of a constant magnetic field on the intensity of deposit formation on the inner surface of a heat-exchange tube during the thermal treatment of petroleum feedstock. Experimental studies were carried out on a laboratory setup at a hot heat-transfer medium temperature of 120 °C, a pressure of 200 kPa, and an initial petroleum stream temperature of 20 °C. The flow velocity varied from 0.396 to 1.59 m/s, while the experiment lasted up to 200 h.

The results demonstrated a significant reduction in deposit formation when magnetic treatment was applied. At a flow velocity of 0.396 m/s and a duration of 200 h, the deposit mass decreased from 0.884 g under conventional heating to 0.0191 g under magnetic-field treatment, corresponding to a 46.28-fold reduction. At a flow velocity of 0.79 m/s, the deposit masses were 0.693 g and 0.0184 g, respectively, with a reduction of 37.66 times. At 1.19 m/s, the corresponding values were 0.480 g and 0.0131 g, with a 36.64-fold reduction. At the maximum flow velocity of 1.59 m/s, the deposit mass decreased from 0.321 g to 0.0089 g, representing a 36.06-fold reduction.

Thus, the application of a constant magnetic field significantly reduces the intensity of deposit formation across the entire range of investigated operating conditions. The highest efficiency was observed at longer operating times and lower flow velocities. Magnetic treatment can therefore be considered an effective reagent-free method for protecting heat-exchange surfaces against deposit formation.

Ключевые слова: нефтяное сырьё, отложения, теплообменная труба, постоянное магнитное поле, магнитная обработка, скорость потока, термическая обработка.

Keywords: petroleum feedstock, deposits, heat-exchange tube, constant magnetic field, magnetic treatment, flow velocity, thermal treatment.

Введение

отдела контроля за качеством образования Филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина в городе Ташкенте

В процессе термической обработки углеводородного сырья асфальтены, смолы, парафины и соли, содержащиеся в его составе, с течением времени образуют отложения на поверхностях теплообмена. Слой данных отложений увеличивает термическое сопротивление оборудования, одновременно уменьшая площадь поперечного сечения труб, что приводит к снижению их пропускной способности и увеличению гидравлического сопротивления. Наряду с этим резко возрастают энергетические и тепловые затраты [1-3].

Для предотвращения накопления отложений в технологических процессах и их удаления применяются химические и механические методы. Однако эти методы не в полной мере оправдывают себя, поскольку отсутствует возможность их применения непосредственно во время работы оборудования.

Одним из современных способов предотвращения накопления слоя отложений является пропускание потока через постоянное магнитное поле. Магнитная обработка жидких углеводородов перед их термической обработкой изменяет структурно-реологические

свойства среды и предотвращает образование твёрдых отложений и минеральных солей. Данный метод действует без применения химических реагентов — за счёт снижения вязкости и изменения процесса кристаллизации [4-7].

При воздействии магнитного поля на жидкие углеводороды перед их термической обработкой происходит поляризация микрочастиц парафинов и асфальтенов, что способствует их кристаллизации. Образовавшиеся крупные структурные соединения не осаждаются на металлических стенках, а свободно перемещаются вместе с потоком. Магнитное воздействие способствует образованию центров кристаллизации непосредственно в объёме жидкости, а не на нагретой поверхности теплообменного оборудования. В результате формируются мягкие отложения, которые легко смываются потоком и не закрепляются прочно на стенках оборудования [8-10].

Образование отложений в теплообменных аппаратах происходит в течение определённого периода времени. Низкая скорость потока в трубах, длительное тепловое воздействие на сырьё и высокая температура ускоряют образование на поверхностях оборудования отложений и минеральных солей, содержащихся в нефти. В результате тепловые потери в оборудовании увеличиваются в пределах от 2 до 60 %.

Основную часть отложений, образующихся в теплообменных аппаратах, работающих при сравнительно низких температурах — от 25 до 50 °С, составляет карбонат кальция ($CaCO_3$) [1].

Одним из современных способов предотвращения образования отложений в теплообменном оборудовании является магнитная обработка потока теплоносителя.

При прохождении жидкости по трубопроводу через магнитное поле на содержащиеся в ней заряженные частицы действует сила Лоренца:

$$F_{\text{Л}} = Q(V \bullet B)$$

где: Q — заряд иона; V — скорость потока; B — магнитная индукция.

Под действием силы Лоренца молекулы в потоке жидкости начинают совершать колебательные движения, вследствие чего возникает резонанс.

Магнитная индукция зависит от максимальной плотности магнитного потока: чем выше её значение, тем сильнее магнитное поле. С повышением температуры среды магнитная индукция постепенно уменьшается. Если температурный коэффициент равен 0,1, то повышение температуры магнита до 100 °С приводит к снижению его магнитной индукции на 10 %.

Материалы и методы

С целью изучения влияния постоянного магнитного поля на процесс накопления отложений на поверхностях теплообмена при нагревании нефтяного сырья была разработана лабораторная установка. Принципиальная схема установки представлена на рисунке 1.

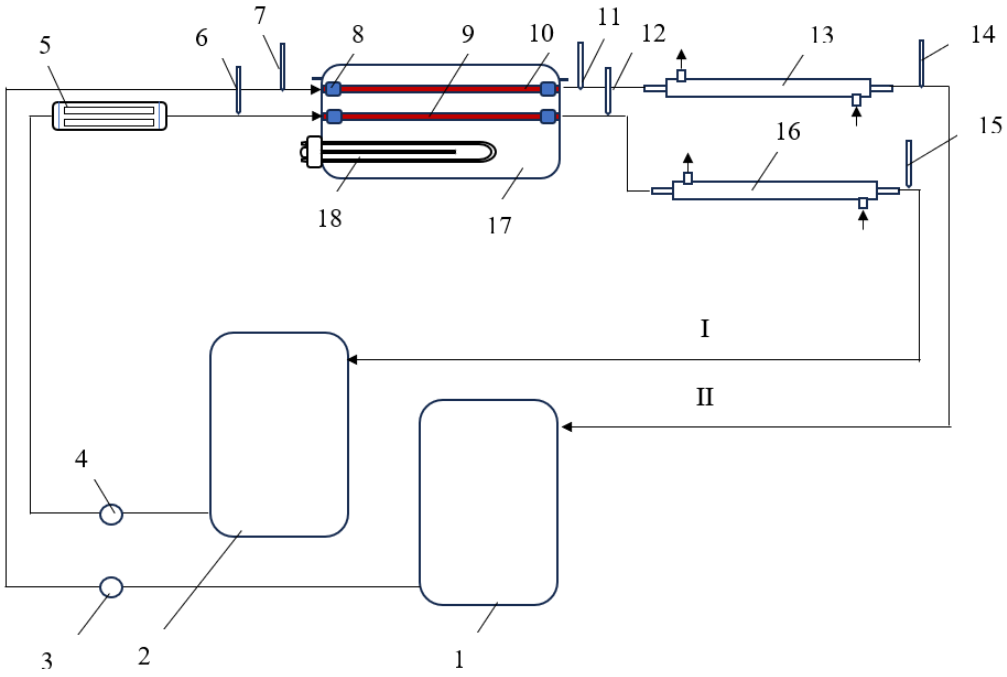


Рисунок 1. Принципиальная схема установки для применения постоянного магнитного поля в процессе нагревания нефтяного сырья:

I — линия потока, подвергаемого воздействию магнитного поля; II — линия обычного потока; 1, 2 — ёмкости для нефти; 3, 4 — центробежные насосы; 5 — *постоянное магнитное поле*, 40 Н; 6, 7 — термометры для измерения начальной температуры потока; 8 — гайка крепления трубы; 9, 10 — экспериментальные трубы; 11, 12 — термометры для измерения температуры потока на выходе из труб; 13, 16 — холодильники; 14, 15 — термометры для измерения температуры холодного потока; 17 — водяная баня; 18 — нагревательный элемент.

Экспериментальные исследования проводились в следующем порядке. В ёмкости для сырья 1 и 2 заливали по 25 литров нефти. В ёмкость 17 устанавливали экспериментальные трубы 9 и 10, после чего её заполняли водой и герметично закрывали. Затем включали нагревательный элемент 18 с автоматическим регулированием температуры мощностью 1,0 кВт. После достижения температуры 120 °С запускали насосы 3 и 4. Потоки, прошедшие термическую обработку, охлаждались водой в холодильниках 13 и 16, после чего возвращались в приёмные ёмкости. Процесс осуществлялся параллельно на линии I, оснащённой постоянным магнитом, и линии II — без магнитного воздействия.

Для создания постоянного магнитного поля использовался ферромагнитный материал. Он представляет собой высокоэнергетический постоянный магнит, изготовленный из сплава редкоземельных элементов. Его кристаллическая структура обладает тетрагональной формой и описывается химической формулой $Nd_2Fe_{14}B$, как указано в таблице 1.

Согласно паспортным данным, ферромагнит класса 40Н сохраняет свою магнитную индукцию до температуры 120 °С. При превышении этой температуры магнитная индукция уменьшается на 2 % на каждые 5 °С. Использование ферромагнита класса 40Н не рекомендуется при температурах выше 120 °С.

Таблица 1. Параметры ферромагнита

Показатели	Величина
Класс	40Н
Индукция магнитного поля, миллитесла (мТл)	1250-1280
Магнитная энергия, килоджоуль на кубический метр (кДж/м³)	302-326
Геометрические размеры, мм	20x10x3
Рабочая температура, °С	120
Масса, г	4,6
Внешний вид	

В лабораторных условиях была собрана конструкция с магнитным полем, устанавливаемая на пути потока углеводородного сырья перед его нагреванием на теплообменных поверхностях (рисунок 2)

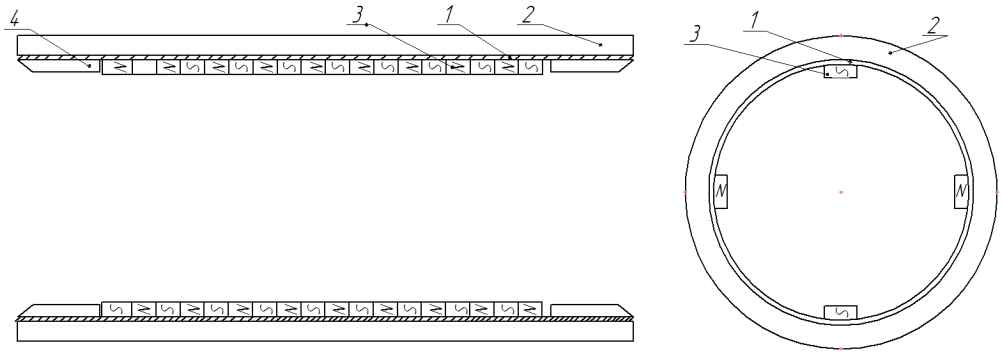


Рисунок 2. Принципиальная схема магнитного проточного устройства:

1 — цилиндрический внутренний корпус; 2 — наружная труба; 3 — секции постоянных магнитов; 4 — крепёжная резьба.

Магнитное проточное устройство включает цилиндрический корпус, выполненный из нержавеющей стали и находящийся внутри наружной трубы. Внутри цилиндрического корпуса расположены 20 постоянных ферромагнитов, размещённые на расстоянии 10 мм друг от друга. Паспортные данные указывают, что магнитная индукция каждого ферромагнита составляет 1270 мТл.

При расчёте гидродинамических режимов течения в трубах важным параметром является их абсолютная шероховатость. Со временем этот показатель увеличивается вследствие накопления слоя отложений на внутренней поверхности труб. Обычно абсолютная шероховатость стальных труб составляет 0,02–0,05 мм. Для труб, изготовленных из нержавеющей стали, данный показатель не превышает 0,01 мм.

Для экспериментального исследования процесса образования отложений на теплообменных поверхностях была выбрана труба из нержавеющей стали марки AISI 304 с низкой абсолютной шероховатостью.

Эксперименты проводились при температуре горячего теплоносителя 120 °С. давлении Р = 200 кПа. Данное значение температуры было выбрано с учётом температуры общего потока нафты, поступающего в теплообменный аппарат. Начальная температура нагреваемого нефтяного потока составляла 20 °С.

При указанных технологических и конструктивных параметрах исследовались процесс накопления отложений за время пребывания сырья с заданными вязкостью и плотностью в нагревательной трубе, а также влияние на этот процесс постоянного магнитного поля.

Объемный расход потока нефти варьировался в пределах 1 4 л/мин. Соответственно, скорость потока в трубе определялась по следующей формуле:

$\omega = \frac{4 \cdot V}{\pi d^2}$ м/с

где: V- объёмный расход нефти, м^3/с; d -внутренний диаметр трубы, d = 0,008 м.

В зависимости от скорости движения потока в трубе температура на её выходе составила: при 0,396 м/с — 101 °С; при 0,79 м/с — 89 °С; при 1,19 м/с — 71 °С; при 1,59 м/с — 56 °С.

Эксперимент на лабораторной установке проводился в течение 200 часов, при этом динамика накопления отложений исследовалась через каждые 50 часов.

(1) При определении накопления накиипи на тепловой поверхности после каждых 50 часов работы устройства трубу снимали со стенда, полностью очищали от остатков нефти, сушили в сушильном шкафу при температуре 120 °С в течение 30 минут и определяли массу накипи, накопленной на поверхности трубы как разность начального и конечного веса трубы. Вес определяли путем взвешивания на электронных весах. При взвешивании использовались лабораторные весы марки OHAUS с максимальным весом груза 100 граммов и дискретностью от 0.0001 до 0.1 грамма.

Результаты и обсуждение

Результаты экспериментального исследования динамики изменения массы отложений в экспериментальной трубе с внутренним диаметром 0,008 м в процессе нагревания представлены в таблице 2.

Таблица 2. Изменения массы отложений на внутренней поверхности трубы при различных режимах

№	Режим работы установки		Масса отложений, г				Сокращение отложений, $\Delta = \frac{m_1}{m_2}$
	скорость потока м/с	*время, t,* ч.	при традиционном нагревании		при воздействии магнитного поля		
			абсолютн m_1	прирост	абсолютн m_2	прирост	
1	0,396	50	0,212		0,0132		16,06
		100	0,435	0,223	0,0151	0,0019	28,81
		150	0,648	0,213	0,0177	0,0026	36,61
		200	0,884	0,236	0,0191	0,0014	46,28
2	0,79	50	0,168		0,0095		17,68
		100	0,326	0,158	0,0106	0,0011	30,75
		150	0,475	0,149	0,0112	0,1014	42,41
		200	0,693	0,218	0,0184	0,1728	37,66
3	1,19	50	0,112		0,0061		18,36
		100	0,255	0,143	0,0082	0,0021	31,09
		150	0,312	0,57	0,0097	0,0076	32,16
		200	0,480	0,168	0,0131	0,0034	36,64

№	Режим работы установки		Масса отложений, г				Сокращение отложений, $\Delta = \frac{m_1}{m_2}$
	скорость потока м/с	*время, t,* ч.	при традиционном нагревании		при воздействии магнитного поля		
			абсолютн m_1	прирост	абсолютн m_2	прирост	
4	1,59	50	0,067		0,0045		14,88
		100	0,141	0,074	0,0068	0,0023	20,73
		150	0,219	0,78	0,0074	0,0006	29,59
		200	0,321	0,102	0,0089	0,0015	36,06

При всех исследованных скоростях потока и продолжительности работы установки применение магнитного поля приводит к существенному снижению массы отложений на внутренней поверхности трубы по сравнению с традиционным нагреванием. Масса отложений при магнитном воздействии составляет примерно 0,0045–0,0191 г, тогда как при традиционном нагревании — 0,067–0,884 г.

Наиболее выраженный эффект наблюдается при низкой скорости потока 0,396 м/с: за 200 ч масса отложений снижается с 0,884 до 0,0191 г, то есть примерно в 46,3 раза. При скорости 0,79 м/с максимальное сокращение составляет 30,75–42,41 раза, при 1,19 м/с — 18,36–36,64 раза, а при 1,59 м/с — 14,88–36,06 раза.

Кроме того, при традиционном нагревании с увеличением времени работы наблюдается практически устойчивый рост массы отложений. При воздействии магнитного поля абсолютная масса отложений также постепенно увеличивается, однако темп их накопления значительно ниже. Это свидетельствует о выраженном ингибирующем воздействии магнитного поля на процессы образования и закрепления отложений.

В целом повышение скорости потока от 0,396 до 1,59 м/с само по себе способствует уменьшению количества отложений при обоих способах нагрева. Однако магнитная обработка сохраняет преимущество во всём исследованном диапазоне режимов. Следовательно, комбинация увеличения скорости потока и воздействия магнитного поля является наиболее эффективным режимом снижения интенсивности образования отложений, что позволяет существенно увеличить продолжительность работы теплообменной поверхности без значительного загрязнения.

Заключение

Проведённые исследования показали, что применение постоянного магнитного поля перед нагреванием нефтяного сырья значительно снижает образование отложений на внутренней поверхности теплообменных труб. При магнитной обработке масса отложений была в несколько десятков раз ниже по сравнению с традиционным нагреванием, а максимальное сокращение достигало 46,28 раза.

Увеличение скорости потока также способствует снижению интенсивности отложений. В целом результаты подтверждают эффективность магнитной обработки как безреагентного метода защиты теплообменного оборудования, позволяющего уменьшить загрязнение поверхностей и повысить эффективность его работы.

Список литературы

1. Исмаилов, О.Ю. Иссиқлик юзаларида дашқол ҳосил бўлиш жараёнига магнит майдонининг таъсири / О.Ю. Исмаилов, Р.А. Юсупов, М.Х. Исмаилов, Д.Н. Исаматова. – Наманган: Muhandis noshr, 2025. – 125 с.
2. Исмаилов, О.Ю. Иссиқлик ташувчи ҳароратини конденсатор узунлиги бўйича тақсимлаш / О.Ю. Исмаилов, Р.А. Юсупов, А.М. Хурмаматов // Инновационные подходы к локализации: материалы Международной конференции (г. Карши, 14 октября 2023 г.). – 2023. – С. 255–257.
3. Исмаилов О.Ю., Юсупов Р.А., Исмаилов М.Х., Исаматова Д.Н. Иссиқлик юзаларида дашқол ҳосил бўлиш жараёнига магнит майдонининг таъсири. Monografiya. “Muhandis noshr” Наманган, С. 125. – 2025.
4. Alabi A., Chiesa M., Garlisi C., Palmisano G. Advances in anti-scale magnetic water treatment // Environmental Science: Water Research & Technology. – 2015. – Т. 1, № 4. – P. 408–425. – DOI: 10.1039/C5EW00052A.
5. Polley G.T., Wilson D.I., Yeap B.L., Pugh S.J. Use of crude oil fouling threshold data in heat exchanger design // Applied Thermal Engineering. – 2002. – Т. 22, № 7. – P. 763–776. – DOI: 10.1016/S1359-4311(02)00021-2.
6. Khalaf M.H., Mansoori G.A., Yong C.W. Magnetic treatment of petroleum and its relation with asphaltene aggregation onset (an atomistic investigation) // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2019. – Т. 176. – P. 926–933. – DOI: 10.1016/j.petrol.2019.01.059.
7. Исмаилов О.Ю., Юсупов Р.А., Хурмаматов А.М. Иссиқлик ташувчи ҳароратини конденсатор узунлиги бўйича тақсимлаш. Материалы международной конференции “Инновационные подходы к Локализацию”. 14 октября г.Карши, С. 255–257. – 2023.
8. Kozic V., Lipus L.C. Magnetic Water Treatment for a Less Tenacious Scale // Journal of Chemical Information and Computer Sciences. – 2003. – Т. 43, № 6. – P. 1815–1819. – DOI: 10.1021/ci0102719.
9. Ben Latifa, S. Cheap-Charpentier, H., Perrot, H., Ben Amor, Y. Effects of Magnetic Field on Homogeneous and Heterogeneous Precipitation of Calcium Carbonate // ChemElectroChem. – 2023. – DOI: 10.1002/celc.202300105.
10. Oybek Ismoilov, Fozilbek Shomansurov, Rustam Yusupov. Kumush Akhmedova,Isroiljon Abdurakhmanov, Mavluda Baltabayeva. The influence of liquid hydrocarbon flow recirculation on the efficiency of heat exchange in a shell-and-tube apparatus. Chemical Papers. Received: 14 May 2025/Accepted: 3 August 2025 The Author(s), under exclusive licence to the Institute of Chemistry, Slovak Academy of Sciences – 2025. DOI: 10.1007/s11696-025-04374-0.

References

1. Ismailov O.Yu., Yusupov R.A., Ismailov M.Kh., Isamatova D.N. The Effect of Magnetic Field on the Process of Crack Formation on Heat-Affected Surfaces. Monograph. 'Muhandis Publisher' Namangan,] (In Uzb.). – 2025. – 125 P.

2. Ismailov O.Yu., Yusupov R.A., Khurmamatov A.M., Issiқlik tashuvchi ҳaroratini kondensator uzunligi bojicha taқsimlash. [Materials of the International Conference 'Innovative Approaches to Localization'. October 14, 2023. Karshi, P. 255–257] (In Uzb.).
3. Ismailov O.Yu., Yusupov R.A., Ismailov M.Kh., Isamatova D.N. [The Effect of Magnetic Field on the Process of Crack Formation on Heat-Affected Surfaces. Monograph. 'Muhandis Publisher' Namangan,] (In Uzb.). – 2025. – 125 P.
4. Alabi A., Chiesa M., Garlisi C., Palmisano G. Advances in anti-scale magnetic water treatment // Environmental Science: Water Research & Technology. – 2015. – Vol. 1, No. 4. – P. 408–425. – DOI: 10.1039/C5EW00052A.
5. Polley G.T., Wilson D.I., Yeap B.L., Pugh S.J. Use of crude oil fouling threshold data in heat exchanger design // Applied Thermal Engineering. – 2002. – Vol. 22, No. 7. – P. 763–776. – DOI: 10.1016/S1359-4311(02)00021-2.
6. Khalaf M.H., Mansoori G.A., Yong C.W. Magnetic treatment of petroleum and its relation with asphaltene aggregation onset (an atomistic investigation) // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2019. – Vol. 176. – P. 926–933. – DOI: 10.1016/j.petrol.2019.01.059.
7. Oybek Ismoilov, Fozilbek Shomansurov, Rustam Yusupov. Kumush Akhmedova,Isroiljon Abdurakhmanov, Mavluda Baltabayeva. The influence of liquid hydrocarbon flow recirculation on the efficiency of heat exchange in a shell-and-tube apparatus. Chemical Papers. Received: 14 May 2025/Accepted: 3 August 2025 The Author(s), under exclusive licence to the Institute of Chemistry, Slovak Academy of Sciences 2025 (In Uzb.) [Электронный ресурс]. – URL: https://doi.org/ (accessed: 11.08.2026).
8. Kozic V., Lipus L.C. Magnetic Water Treatment for a Less Tenacious Scale // Journal of Chemical Information and Computer Sciences. – 2003. – Vol. 43, No. 6. – P. 1815–1819. – DOI: 10.1021/ci0102719.
9. Ben Latifa, S. Cheap-Charpentier, H., Perrot, H., Ben Amor, Y. Effects of Magnetic Field on Homogeneous and Heterogeneous Precipitation of Calcium Carbonate // ChemElectroChem. – 2023. – DOI: 10.1002/celc.202300105.
10. Oybek Ismoilov, Fozilbek Shomansurov, Rustam Yusupov. Kumush Akhmedova,Isroiljon Abdurakhmanov, Mavluda Baltabayeva. The influence of liquid hydrocarbon flow recirculation on the efficiency of heat exchange in a shell-and-tube apparatus. Chemical Papers. Received: 14 May 2025/Accepted: 3 August 2025 The Author(s), under exclusive licence to the Institute of Chemistry, Slovak Academy of Sciences – 2025. DOI: 10.1007/s11696-025-04374-0.

МЕТАЛЛУРГИЯ, МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ГОРНОЕ ДЕЛО

Статья поступила в редакцию: 08.10.2026
Статья принята к публикации: 20.10.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 622.7+621.926+621.891

Исследование износа деталей конусных дробилок обогатительных фабрик

Абдукаххаров Абдуазиз Абдулазизхон угли
ст. преп
Алмалыкского филиала Ташкентского государственного технического университета имени Ислама Каримова
Республика Узбекистан, Алмалык

Ахмадалиев Шохрух Шухратович
д-р филос. по техн. наукам (PhD),
кафедра Технологии металлов, машины и оборудования, машиностроение
Алмалыкский государственный технический институт,
Республика Узбекистан, Алмалык
E-mail: abduaziz0594@gmail.com

Research on the wear and tear of conical crusher parts at enrichment facilities

Abdukakhkharov Abduaziz Abdulazizkhon ugli
Senior Lecturer
Almalyk Branch of the
Islam Karimov Tashkent State Technical University
Republic of Uzbekistan, Almalyk

Akhmadaliev Shokhrukh Shukhratovich
PhD in Technical Sciences,
Department of Metal Technologies, Machinery and Equipment, Mechanical Engineering
Almalyk State Technical Institute,
Republic of Uzbekistan, Almalyk

Аннотация

В статье рассматриваются основные виды износа деталей конусных дробилок, эксплуатируемых на горно-обогатительных предприятиях. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения надёжности, долговечности и эффективности работы дробильного оборудования в условиях интенсивного воздействия твёрдых и абразивных частиц перерабатываемой руды. Проанализированы основные причины

Библиографическое описание: Абдукаххаров А.А.У., Ахмадалиев Ш.Ш. Исследование износа деталей конусных дробилок обогатительных фабрик // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23591

изнашивания рабочих поверхностей дробящего конуса, футеровки и посадочных мест, а также их влияние на техническое состояние оборудования и стабильность технологического процесса. Особое внимание уделено фреттинг-коррозии, абразивно-ударному и коррозионно-механическому износу, которые могут приводить к нарушению геометрических параметров деталей, ухудшению качества дробления и возникновению аварийных остановок. Рассмотрены современные методы повышения износостойкости и восстановления работоспособности деталей конусных дробилок, включая применение износостойких материалов, защитных покрытий, композиционных материалов и восстановительной наплавки. Отдельно отмечена роль последующей механической обработки и шлифования в обеспечении требуемой точности сопрягаемых поверхностей. Цель работы заключается в анализе механизмов изнашивания деталей конусных дробилок и рассмотрении перспективных технических решений, направленных на увеличение срока их службы. Практическая значимость исследования состоит в систематизации существующих методов защиты и восстановления изношенных деталей, которые могут быть использованы при разработке мероприятий по повышению эксплуатационной надёжности дробильного оборудования.

Abstract

This article examines the main types of wear on the components of conical crushers used in mining and processing enterprises. The relevance of the study is determined by the need to increase the reliability, durability, and operational efficiency of crushing equipment under conditions of intensive exposure to hard and abrasive particles of the processed ore. The main causes of wear on the working surfaces of the crushing cone, lining, and seating areas, as well as their impact on the technical condition of the equipment and the stability of the technological process, have been analyzed. Particular attention is paid to fretting corrosion, abrasive-impact, and corrosion-mechanical wear, which can lead to the disruption of geometric parameters, deterioration of crushing quality, and the occurrence of emergency stops. Modern methods for increasing the wear resistance and restoring the operability of cone crusher parts, including the use of wear-resistant materials, protective coatings, composite materials, and restorative surfacing, have been considered. The role of subsequent mechanical treatment and grinding in ensuring the required precision of the interconnected surfaces is noted separately. The aim of the study is to analyze the mechanisms of wear in cone crusher parts and to consider promising technical solutions aimed at increasing their service life. The practical significance of the research lies in systematizing existing methods for protecting and restoring worn-out parts, which can be used in developing measures to increase the operational reliability of crushing equipment.

Ключевые слова: конусные дробилки, износ, футеровка, компаундный материал, наплавка.

Keywords: cone crushers, wear, lining, composite material, surfacing.

Введение

Обогатительные фабрики горно-металлургических предприятий в настоящее время используют различные виды дробилок. Среди различных видов дробилок наиболее широко распространены конусные дробилки типа КМД-2200 и КМД-2200Т[7].

Дробилки этого типа имеют различные модификации и применяются для дробления различных пород руды и материалов. В горнорудной промышленности для дробления руды с высоким содержанием породы и твердых частиц, с высокой абразивностью.

Технологическое оборудование обогатительных фабрик имеют большие линейные размеры, массы, установленную мощность. При этом оборудование тесно увязаны технологическим процессом. Выход из строя одного из звеньев технологической цепочки приводит к снижению производительности, большим материальным и финансовым затратам[5].

Цель исследования — проанализировать основные виды и причины износа деталей конусных дробилок, эксплуатируемых на обогатительных фабриках, и рассмотреть перспективные способы повышения их износостойкости и эксплуатационной надёжности.

Для достижения поставленной цели определены следующие задачи исследования: выявить характерные виды износа основных узлов конусных дробилок; рассмотреть причины повреждения посадочных поверхностей, дробящего конуса и футеровки; проанализировать возможности применения композиционных материалов для защиты контактных поверхностей; оценить перспективы использования восстановительной наплавки и финишной механической обработки при ремонте изношенных деталей[6].

Практическая значимость работы заключается в систематизации технических решений, которые могут использоваться при выборе способов защиты и восстановления деталей конусных дробилок, а также при разработке мероприятий по повышению надёжности дробильного оборудования.

Материалы и методы

Возрастание объемов перерабатываемой руды, увеличение удельных мощностей оборудования требует совершенствования конструкций дробилок, повышения эффективности работы составных частей за счёт применения современных материалов, своевременного и грамотного технического обслуживания

Одним из распространенных методов обеспечения эффективной работы оборудования является своевременное выявление деталей, рабочие поверхности которых имеют недопустимые износы различных видов и восстановление геометрических размеров этих деталей [1].

Детали дробилок в зависимости от условий работы, месторасположения, вида сопряжения, динамических нагрузок имеют величину износа (Таблица 1).

Таблица 1. Предельные величины износа и механизмы повреждений узлов конусных дробилок КМД-2200 и КМД-2200Т

Узел / Деталь дробилки	Допустимый износ	Преобладающий механизм износа	Последствия превышения нормы износа
Посадочные места подшипников	0,5 – 1,0 мм	Фреттинг-коррозия, контактное усталостное выкрашивание	Потеря точности сопряжения, биение, аварийная остановка
Посадочные поверхности конуса	1,0 – 3,0 мм	Фреттинг-коррозия, коррозионно-механическое изнашивание	Натиры, вырывы металла, проворачивание брони футеровки
Дробильный конус и броня (футеровка)	50 – 60 мм	Абразивно-ударный износ	Увеличение проходного сечения, изменение фракционного состава руды

Особенно износ дробильного конуса приводит к нарушению технологического режима: увеличению проходного сечения, вследствие износа меняется фракция перерабатываемой руды, ухудшаются технологические показатели оборудования, технологической цепочки, аварийные остановы и соответственно увеличение эксплуатационных расходов[8].

Наблюдается износ посадочных мест конуса дробилки. В результате износа также ухудшаются технологические показатели дробилки, происходит проворачивание брони футеровки, аварийный останов дробилки.

Поверхность конуса заливается цинком. Износ или выкрашивание цинкового покрытия приводит к разрушению брони.

Результаты и обсуждения

Исследованиями установлено, что износ и дефекты в процессе работы дробилок является результатом фреттинг-коррозии, которая приводит к коррозионно-механическому изнашиванию поверхностей конуса и его посадочных мест. Твердые частицы перемалываемой руды поверхность конуса подвергают к схватыванию. Дефекты схватывания проявляются в виде натиров, вырывов материала поверхности конуса, деформированные в процессе оксиды приводят к сильному окислению поверхности.

Дальнейшее развитие фреттинг-коррозии способствует разрушению участков. Циклические деформации поверхности материала конуса приводят к сильному снижению прочности, изменению структуры поверхностных слоев[3].

В настоящее время вместо заливки цинка применяется покрытие поверхности конуса композиционными материалами. Перспективным является композиционный материал «Мультипласт», состоящий из двух компонентов. Композиционный материал заливается в жидком состоянии и не имеет адгезию с металлом конуса. После затвердевания компаунд имеет прочность при растяжении 26 МПа, при изгибе 70 МПа. При заливке компаундом отношение расхода материала компаунда и цинка составляет 1:6.

Для повышения износостойкости и предупреждения фреттинг-коррозии наибольший эффект достигается поверхностным упрочнением, химико-термической обработкой, наплавкой и напылением. Применение методов поверхностного упрочнения наплавкой

является наиболее доступным способом как по простоте оборудования, универсальности, так и сварочным материалам, имеющим различные технологические и эксплуатационные свойства[4].

Износостойкость в зависимости от применяемого сварочного материала повышается до 1,5 раза по сравнению с неупрочненной поверхностью.

Предварительные эксперименты показали, что нанесение покрытия с буферным слоем и упрочняющим слоем наплавочной проволокой позволяют одновременно восстанавливать и упрочнять рабочие поверхности конусов дробилок. После наплавки производится механическая обработка и шлифование. Финишные операции производятся переносными или стационарными станочными оборудованиями. Снижение высоты микрошероховатостей шлифованием увеличивает площадь контакта сопрягаемых поверхностей, снижает удельные нагрузки, радиальное биение [2].

Заключение

Применение современных композиционных материалов для нанесения упрочняющих покрытий и повышение точности финишных обработок операций при обработке существенно повышают износостойкость покрытий, продлевает срок службы дробильного оборудования.

Список литературы

1. Бойко П.Ф. Ремонтное восстановление точности конусных дробилок // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № S5. – С. 12–15.
2. Бойко П.Ф., Титиевский Е.М., Тимирязев В.А. Технологические особенности эксплуатации, ремонта, восстановления и модернизации конусных дробилок большой единичной мощности // Горный журнал. – 2017. – С. 71–75. – DOI: 10.17580/gzh. 2017.04.14.
3. Великанов В.С., Дёрина Н.В., Панфилова О.Р. Методы искусственного интеллекта в оценке степени износа футеровочной брони конусных дробилок // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 2 (74). – С. 202–211. – DOI: 10.26731/1813–9108.2022.2(74).202–211.
4. Гончаров А.Б., Тулинов А.Б., Иванов В.А., Гончаров А.А. Технологии восстановления основных узлов конусных дробилок. – Электронный ресурс [Электронный ресурс]. URL: https://mosintrast.ru/about/article/test-piost6 (дата обращения: 22.10.2026).
5. Дынген М.Ю. Диагностика состояния деталей горной техники при износах и поломках / М.Ю. Дынген, Н.П. Кузьмин // Диагностика систем, машин и оборудования. – 2017. – Т. 5, № 2. – С. 15–182.
6. Островский М.С. Фреттинг как причина снижения надежности горных машин // Горное оборудование и электромеханика. – 2011. – № 9. – С. 18–23.
7. Сумин А. Быстрое победы реформирования ТОиР // Рискнув Нет. – 2015. – № 3. – С. 2–8.

8. Эргашев М., Якубов Л.Э., Саъдуллаев З.Ш., Комилов И.Р. Эргашев Махмуд, Якубов Лазизхон Эргашхонович, Саъдуллаев Зариф Шарипович, Комилов Исломжон Раимкул Углы СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РЕМОНТНЫХ РАБОТ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗНОШЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ГОРНОГО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ // Universum: технические науки. – 2024. – № 5 (122). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sostoyanie-i-perspektivy-remontnyh-rabot-vosstanovleniya-iznoshennyh-detaley-gornogo-metallurgicheskogo-oborudovaniya (дата обращения: 20.10.2026).

References

1. Bojko P.F. [Repair restoration of the accuracy of cone crushers] // Gornyj informatsionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal). – 2015. (In Russ.).
2. Bojko P.F., Titievskij E.M., Timiryazev V.A. [Technological features of operation, repair, restoration and modernization of large unit capacity cone crushers] // Gornyj zhurnal. – 2017. – DOI: 10.17580/gzh.2017.04.14. (In Russ.).
3. Velikanov V.S., Dyorina N.V., Panfilova O.R. [Artificial intelligence methods in assessing the degree of wear of the lining armor of cone crushers] // Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie. – 2022. – No. 2 (74). – DOI: 10.26731/1813–9108.2022.2(74).202–211. (In Russ.).
4. Goncharov A.B., Tulinov A.B., Ivanov V.A., Goncharov A.A. [Technologies for restoring the main assemblies of cone crushers]. – Elektronnyj resurs [Электронный ресурс]. – URL: https://mosintrast.ru/about/article/test-piost6 (accessed: 22.10.2026). (In Russ.).
5. Dyngen M.Yu., Kuz'min N.P. [Diagnostics of the condition of mining machinery parts under wear and breakdowns] // Diagnostika sistem, mashin i oborudovaniya. – 2017. – Vol. 5, No. 2. (In Russ.).
6. Ostrovskij M.S. [Fretting as a cause of reduced reliability of mining machines] // Gornoe oborudovanie i elektromekhanika. – 2011. – No. 9. (In Russ.).
7. Sumin A. [Quick wins of reforming maintenance and repair] // Risknuv Net. – 2015. – No. 3. (In Russ.).
8. Ergashev M., Yakubov L.E. Sa«dullaev Z.Sh., Komilov I.R. [Ergashev Makhmud, Yakubov Lazizkhon Ergashkhonovich, Sa'dullaev Zarif Sharipovich, Komilov Islomzhon Raimkul Ugli STATE AND PROSPECTS OF REPAIR WORK FOR RESTORATION OF WORN PARTS OF MINING AND METALLURGICAL EQUIPMENT] // Universum: tekhnicheskie nauki. – 2024. – No. 5 (122) [Электронный ресурс]. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sostoyanie-i-perspektivy-remontnyh-rabot-vosstanovleniya-iznoshennyh-detaley-gornogo-metallurgicheskogo-oborudovaniya (accessed: 22.10.2026). (In Russ.).

Статья поступила в редакцию: 12.10.2026
Статья принята к публикации: 18.10.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 669.712: 622.7: 553.4

DOI: 10.32743/UniTech.2026.151.10.23579

Переработка алунитовых руд месторождения Гушсай (Узбекистан) для получения глинозёма

Алматов Илхомжон Мирзабек угли
д-р техн. наук
ст. науч. сотр. Заведующий центром ГУ Институт минеральных ресурсов
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: ilkhom90@list.ru

Алимов Дилшод Ширинкулович
базовый докторант
Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: d.alimov1989@gmail.com

Нурмухамедов Иброхим Суннатуллаевич
начальник лаборатории технологии переработки рудных полезных ископаемых
ГУ Институт минеральных ресурсов
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: nurmuhamedov85@list.ru

Processing of alunite ores from the Gushsai deposit, Uzbekistan, for alumina production

Almatov Ilkhomjon
doctor of Technical Sciences, senior researcher
Head of the Center of the State Institution Institute of Mineral Resources
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Alimov Dilshod
Doctoral student of Tashkent State Technical University named after Islam Karimov
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Nurmukhamedov Ibrokhim
Head of the Laboratory of Ore Processing Technology of the State Institution Institute of Mineral Resources
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Библиографическое описание: Алматов И.М.У., Алимов Д.Ш., Нурмухамедов И.С. Переработка алунитовых руд месторождения Гушсай (Узбекистан) для получения глинозёма // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23579

Аннотация

В статье рассматриваются вопросы комплексной переработки алунитовых руд месторождения Гушсай (Узбекистан) с целью селективного извлечения оксида алюминия (глинозёма). В качестве объекта исследования использован алунитовый флотационный концентрат, содержащий 20,19 % Al_2O_3 и ~35,62 % алунита. Методология работы основана на сочетании предварительной пирометаллургической активации и последующего сернокислотного выщелачивания в периодическом режиме. Подбор оптимальных параметров осуществлялся варьированием температуры, концентрации растворов и продолжительности фаз. Установлено, что термический обжиг концентрата в интервале 450 – 550°C в течение 120 мин в без доступа кислорода обеспечивает полную дегидроксилацию алунита с формированием активной рентгеноаморфной фазы, при этом абсолютное содержание Al_2O_3 в огарке возрастает до 21,23 %. Определены оптимальные условия гидрометаллургического растворения активированного огарка (10 %-й раствор H_2SO_4, Ж:Т=5:1, температура 90°C, продолжительность 120 мин, скорость перемешивания 240 об/мин), обеспечивающие переход 79,50 – 87,78 % алюминия в жидкую фазу. Обоснована схема очистки растворов методом селективного гидролитического осаждения примесей (Fe, Cr, Ni) при pH 3,5 – 4,5 и температуре 90°C. Последующее осаждение промежуточного продукта аммиачной водой (pH 6,5-7,0) и финишная кальцинация при 1300°C в течение 60 мин позволили получить кондиционный оксид алюминия со стабильной корундовой структурой (α – Al_2O_3) и итоговой чистотой целевого компонента 98,17 %. Полученные результаты могут быть использованы в цветной металлургии и химической промышленности для организации не бокситового производства высокочистого сырья, ориентированного на индустрию технической керамики, огнеупоров и высокопрочных абразивов.

Abstract

The article addresses the integrated processing of alunite ores from the Gushsay deposit (Uzbekistan) with the aim of selectively recovering aluminium oxide (alumina). A flotation alunite concentrate containing 20.19 % Al_2O_3 and ~35.62 % alunite was used as the object of study. The methodology combines preliminary pyrometallurgical activation with subsequent sulphuric acid leaching in batch mode; the optimal parameters were selected by varying temperature, solution concentration, and phase duration. It was established that thermal roasting of the concentrate at 450 – 550°C for 120 min under an oxygen-free atmosphere ensures complete dehydroxylation of alunite with the formation of an active X-ray amorphous phase, whereby the absolute Al_2O_3 content in the calcine increases to 21.23 %. The optimal conditions for hydrometallurgical dissolution of the activated calcine were determined (10 % H_2SO_4 solution, L:S = 5:1, temperature 90°C, duration 120 min, stirring speed 240 rpm), providing the transfer of 79.50 – 87.78 % of aluminium into the liquid phase. A purification scheme for the solutions by selective hydrolytic precipitation of impurities (Fe, Cr, Ni) at pH 3.5-4.5 and 90°C was substantiated. Subsequent precipitation of the intermediate product with ammonia water (pH 6.5 – 7.0) and final calcination at 1300°C for 60 min yielded specification-grade aluminium oxide with a stable corundum structure (α – Al_2O_3) and a

final purity of the target component of 98.17 %. The results obtained can be applied in non-ferrous metallurgy and the chemical industry for organising bauxite-free production of high-purity raw materials intended for the technical ceramics, refractories, and high-strength abrasives industries.

Ключевые слова: алунитовая руда, флотационный концентрат, термическая активация, дегидроксилация, сернокислотное выщелачивание, гидролитическая очистка, кальцинация, корунд, оксид алюминия.

Keywords: alunite ore, flotation concentrate, thermal activation, dehydroxylation, sulphuric acid leaching, hydrolytic purification, calcination, corundum, aluminium oxide.

Введение

Оксид алюминия (глинозём – Al_2O_3) благодаря своим высоким физическим и химическим свойствам широко используется в абразивной, керамической, огнеупорной, цементной и химической промышленности [1, с. 44]. Помимо этого, он остаётся единственным промышленным предшественником металлического алюминия (Al) [2, с. 557].

На сегодняшний день около 90% первичного алюминия в мировом масштабе получают из бокситовых месторождений. Вместе с тем доля целевого компонента в известных запасах бокситов не превышает 10% от общемирового объёма ресурсов данного металла. Нарастающая потребность в Al_2O_3 обусловила перестройку минерально-сырьевой базы отрасли: наряду с бокситами в качестве альтернативных источников рассматриваются алуниты и нефелины [3, с. 2678; 4, с. 36]. Среди нетрадиционных видов минерального сырья наибольшие перспективы связываются с алунитовыми рудами состава $KAl_3(SO_4)_2(OH)_6$ [5, с. 217], комплексная переработка которых позволяет одновременно получать глинозём, сульфат калия и серную кислоту [6, с. 122].

Практика промышленного освоения алунита охватывает несколько этапов. Её историческую основу составляет многолетняя эксплуатация Кировабадского (Гянджинского) глинозёмного завода в Азербайджане на базе руд месторождения Заглик [7, с. 2149]. Следующим шагом стали крупномасштабные испытания опытно-промышленного комплекса Alumet в США, ориентированного на запасы гор Уо-Уо (Wah Wah Mountains, Юта) [8, с. 833]. Современный этап развития технологий представлен гидрометаллургическими разработками корпорации Zijin Mining Group в Китае по утилизации техногенных алунитсодержащих хвостов медной флотации месторождения Цзыцзиньшань [9, с. 2; 10, с. 1029]. В Узбекистане технологический потенциал алунитовых руд месторождения Гушсай изучался в разные годы: в 1972-1975 гг. исследовались возможности получения коагулянтов и алунита, в 1991 г. – комплексной переработки руды, а в 2012-2016 гг. – обогащения алунитового сырья и синтеза алюмокалиевых квасцов [11, с. 250].

Целью настоящего исследования является физико-химическое обоснование и разработка эффективной технологии комплексной переработки алунитовых руд месторождения Гушсай (Узбекистан) с приоритетным извлечением глинозёма.

Материалы и методы

Объектом исследования являлась средняя проба алунитовой руды месторождения Гушсай (Ташкентская область, Узбекистан). Химический состав руды определяли спектрофотометрическим методом UV-VIS и титрованием, гранулометрический состав – методом ситового анализа с использованием аппарата ASM200 (Siebtechnik GmbH, Германия), минералогический состав – микроскопическим исследованием шлифов и аншлифов на микроскопе Polam-R312. Исходная проба содержала 20,19 % Al_2O_3, 40,61 % SiO_2, 4,24 % Fe_2O_3, 4,24 % K_2O и 22,63 % потерь при прокаливании. Основными минералами являлись алунит (35,62 %) и кварц (34,51 %); также были установлены каолинит (4,10 %) и плагиоклаз (4,93 %). В мелких гранулометрических классах содержание Al_2O_3 достигало 22,74 %. Подробные результаты исследования вещественного состава и гранулометрических характеристик руды представлены в наших предыдущих работах [12, с. 90].

В предыдущих исследованиях была изучена флотационная обогатимость алунитовой руды при различной крупности измельчения, pH среды и расходе собирателей. Установлены следующие оптимальные параметры: содержание класса -0,074 мм – 85 %, pH пульпы – 10, расход олеата натрия и таллового масла – по 500 г/т. Извлечение алунита в суммарный концентрат составило 94,3 %, а в замкнутом цикле содержание алунита в концентрате достигло 60,97 % при извлечении 87,48 % [12, с. 93]. Полученные результаты использовали в качестве исходной научно-технологической основы для дальнейшего исследования химической переработки алунитсодержащего сырья.

Начальная стадия пирометаллургической переработки включала термическую активацию полученного алунитового флотационного концентрата, которую проводили в лабораторной муфельной печи в интервале температур 450 – 550°C в течение 2 ч. Данный процесс осуществляли в изолированном от доступа воздуха (бескислородном) режиме с целью селективной декарбонизации сырья и частичного удаления углекислых газов из сопутствующих карбонатных минералов без окисления сульфидных фаз. В результате удаления конституционной влаги, конституционных газов и сопутствующего снижения массы термоактивированного продукта условное содержание Al_2O_3 в прокаленной шихте возрастало до 21,23 %.

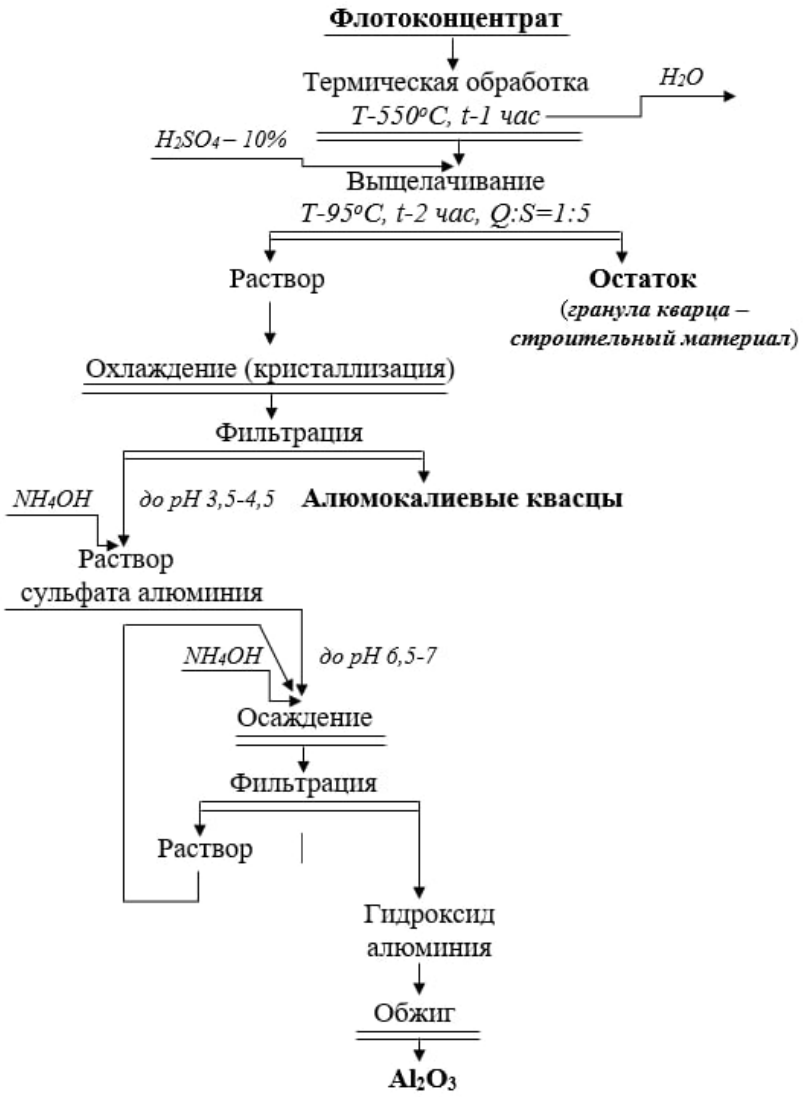


Рисунок 1. Принципиальная технологическая схема переработки флотационного концентрата

В ходе серии поисковых экспериментов по последовательному варьированию ключевых факторов (температуры, концентрации растворов и продолжительности фаз) были установлены следующие оптимальные параметры гидрометаллургической переработки активированного огарка (рис.1.). Выщелачивание осуществляли 10 %-ным раствором H_2SO_4 в периодическом режиме при соотношении жидкой и твердой фаз Ж:Т=5:1 [13, с. 28]. Процесс растворения протекал в течение 2 ч при интенсивном механическом перемешивании со скоростью 240 об/мин, обеспечивая переход 79,50-87,78 % алюминия в жидкую фазу. Разделение полученной суспензии на кремнийсодержащий кек (нерастворимый остаток) и продуктивный сульфатный раствор выполняли методом фильтрации.

Извлечение алюмокалиевых квасцов из полученного фильтрата проводили путем его контролируемого охлаждения с последующим отделением образовавшейся кристаллической фазы. Оставшийся маточный раствор очищали от примесей железа, хрома и никеля методом гидролитического осаждения; для этого при температуре 90°C в систему вводили аммиачную воду до достижения значений pH 3,5 – 4,5, после чего бурый осадок гидроксидов примесных металлов отделяли на вакуум-фильтре. На финишном этапе очищенный раствор нейтрализовали аммиачной водой до pH 6,5 – 7,0 для полного осаждения промежуточного

алюминий содержащего соединения. Полученный гидроксидный осадок подвергали вакуумному фильтрованию, высушиванию и последующему высокотемпературному кальцинационному обжигу в течение 60 мин при температуре 1300°C. Данная технологическая последовательность позволила получить конечный кондиционный оксид алюминия (глинозем) с итоговым содержанием целевого компонента Al_2O_3 на уровне 98,17 %.

Результаты и обсуждения

Исследовано влияние параметров термической активации флотационного алунитового концентрата, кинетики сернокислотного выщелачивания и температуры финальной кальцинации на показатели полупродуктов и конечного продукта.

Термическая активация концентрата. Обжиг осуществляли в интервале 450-550°C в течение 120 мин в отсутствие доступа воздуха. В указанных условиях протекает полная дегидроксилация алунита $KAl_3(SO_4)_2(OH)_6$ с удалением конституционной влаги и формированием рентгеноаморфной фазы, легкорастворимой в кислых средах; а также частичное разложение сопутствующих карбонатов. Бескислородная атмосфера предотвращает окисление пирита до растворимых сульфатов железа и ограничивает загрязнение продуктивных растворов. Потеря массы огарка за счёт удаления летучих компонентов обусловливает рост содержания Al_2O_3 с 20,19 до 21,23 %. Данный прирост (5,15 % отн.) носит концентрационный характер и не связан с обогащением материала.

Кинетика сернокислотного выщелачивания огарка. Выщелачивание огарка проводили 10 %-ным раствором H_2SO_4 при Ж:Т=5:1, варьируя продолжительность (60, 90, 120, 150 мин) и температуру (70, 80, 90, 100°C). При повышении температуры от 70 до 90°C и увеличении продолжительности от 60 до 120 мин извлечение алюминия в раствор достигало 79,50-87,78 %. Лимитирующей стадией, по-видимому, является диффузия кислоты через пористый кремнеземистый слой к реакционной зоне, и при 90°C её скорость становится оптимальной. Увеличение продолжительности до 150 мин и повышение температуры до 100°C не приводит к дальнейшему росту извлечения алюминия, но ускоряет растворение кварца и диккита, что увеличивает содержание кремния в растворе. Пульпу фильтровали с отделением нерастворимого кремнистого кека от продуктивного сульфатного раствора.

Гидролитическая очистка и получение оксида алюминия. Охлаждением продуктивного раствора выделяли алюмокалиевые квасцы, что обеспечивало первичное отделение основной массы алюминия и калия. Маточный раствор очищали от примесей Fe, Cr, Ni методом селективного гидролитического осаждения при 90°C. Поддержание pH в диапазоне 3,5-4,5 дозированием аммиачной воды обеспечивает практически полное осаждение железа в виде $Fe(OH)_3$, тогда как алюминий остаётся в растворе. После вакуум-фильтрации осадка pH очищенного фильтрата повышали до 6,5-7,0, осаждая промежуточный гидроксид алюминия.

Таблица 1. Результаты термической обработки соединения алюминия

Продукт	Количество, %; Al_2O_3	Температура, °C
Алюминиевый продукт	96,3	1200
Алюминиевый продукт	97,2	1250
Алюминиевый продукт	98,17	1300
Алюминиевый продукт	98,17	1350

Влияние температуры кальцинации (1200-1350°C, 60 мин) на содержание Al_2O_3 в конечном продукте показано на рис.2. При 1200°C оно составляет 96,3 %, что указывает на неполное разложение остаточных сульфатных фаз. При 1250°C содержание возрастает до 97,2 %, а при 1300°C достигает максимума – 98,17 %, вследствие завершения десульфатизации и перекристаллизации низкотемпературных модификаций в стабильную высокоплотную фазу α – Al_2O_3 (корунд). Нагрев до 1350°C чистоту не изменяет (98,17 %), что подтверждает стабильность корундовой структуры.

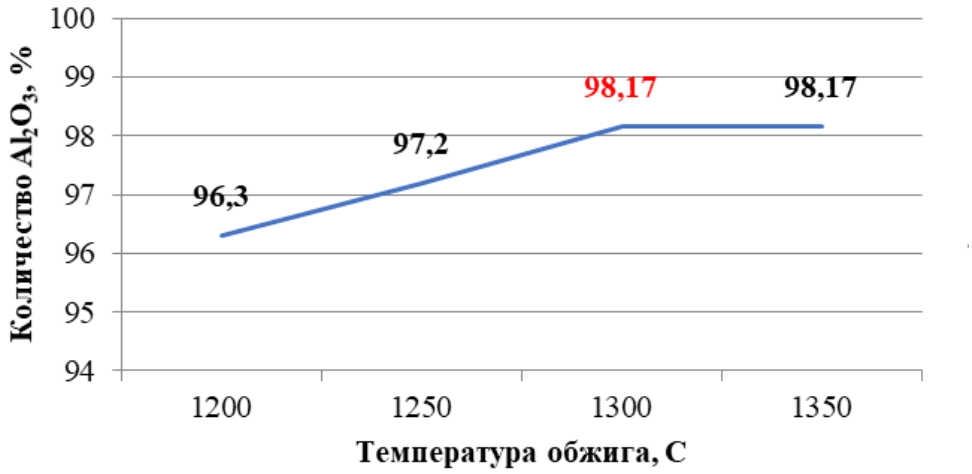


Рисунок 2. Зависимость количества Al_2O_3 от температуры обжига, %

Заключение

На основе экспериментальных исследований по разработке технологии комплексной переработки алунитовых руд месторождения Гушсай сформулированы следующие выводы:

Установлено, что термическая активация флотационного концентрата в интервале 450 – 550°C в течение 120 мин в бескислородной атмосфере обеспечивает полную дегидроксилацию алунита с формированием рентгеноаморфной фазы. Вследствие удаления летучих компонентов содержание Al_2O_3 в огарке возрастает с 20,19 до 21,23 % (прирост 5,15 % отн.), что носит исключительно концентрационный характер.

Определены оптимальные параметры сернокислотного выщелачивания термоактивированного огарка: 10 %-й раствор H_2SO_4, Ж:Т=5:1, температура 90°C, продолжительность 120 мин, скорость перемешивания 240 об/мин. Указанные условия обеспечивают максимальный перевод алюминия в сульфатный раствор на уровне 79,50 – 87,78 %; лимитирующей стадией процесса является диффузия кислоты через пористый кремнеземистый слой.

Обоснована технологическая схема глубокой очистки маточных растворов методом селективного гидролитического осаждения примесей при 90°C и pH 3,5 – 4,5. Последующее осаждение аммиачной водой при pH 6,5 – 7,0 и финальная кальцинация промежуточного продукта при 1300°C в течение 60 мин обеспечивают получение кондиционного оксида алюминия со стабильной корундовой структурой (α – Al_2O_3) и чистотой целевого компонента 98,17 %.

Список литературы

1. Bray E.L. Bauxite and alumina // Mining Engineering. – 2011. – T. 63, № 6. – P. 44–45.
2. Barry T.S., Uysal T., Birinci M., Erdemoğlu M. Thermal and Mechanical Activation in Acid Leaching Processes of Non-bauxite Ores Available for Alumina Production – A Review // Mining, Metallurgy & Exploration. – 2019. – T. 36. – P. 557–569. – DOI: 10.1007/s42461-018-0025-7.
3. Babayeva P. Heydərov A., Turan M.D. et al. Optimization of Aluminum Leaching from Alunite Ore with NaOH Using Response Surface Methodology (RSM) // Journal of Sustainable Metallurgy. – 2025. – T. 11. – P. 2677–2687. – DOI: 10.1007/s40831-025-01156-6.
4. Taghiyev E.I., Tagijev E., Agajeva L. Cost Effective Technology of Alunite Ore Processing // International Journal of Chemistry. – 2019. – T. 11, № 1. – P. 36–42. – DOI: 10.5539/ijc.v11n1p36.
5. Özdemir M., Çetişli H. Extraction kinetics of alunite in sulfuric acid and hydrochloric acid // Hydrometallurgy. – 2005. – T. 76, № 3–4. – P. 217–224. – DOI: 10.1016/j.hydromet.2004.11.003.
6. Gamidov R.G., Teymurova E.A., Jafarov Y., Ibragimov A., Ibragimova F., Mammadov A., Abdullaev N. Development of ammonia-alkaline method of complex processing of alunite ore // Azerbaijan Chemical Journal. – 2023. – № 1. – P. 122–128. – DOI: 10.32737/0005-2531-2023-1-122-128.
7. Ibrahimov A.A., Namazov S., Safarov J., Yusubov F., Vakilova R., Hasanov R.I. Innovative Sulphite Method for Optimizing Aluminum Oxide Production from Alunite Ore // International Journal of Design & Nature and Ecodynamics. – 2024. – T. 19, № 6. – P. 2149–2159. – DOI: 10.18280/ijdne.190631.
8. Miller J.D., Ackerman J.B. Bench scale flotation of alunite ore with oleic acid // Fine Particles Processing: Proceedings of the International Symposium on Fine Particles Processing, Las Vegas, Nevada. – 1980. – T. 1. – P. 832–852.
9. Zhao W., Yao X.-L., Zhong S.-P., Zhu Y.-Y., Yang X., Yi L., Li G., Song J., Yu H., Ruan R., Qi T. Extraction of Al and K salts from associated alunite tailings by an acid calcination-water leaching method // Journal of Cleaner Production. – 2015. – P. 1–7. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.05.103.
10. Zhu M., Chen H., Zhong S.-P., Huang Z., Chen X., Hu Z.-B. Beneficiation of Ga from alunite concentrates by selective acid leaching and alkaline precipitation // Physicochemical Problems of Mineral Processing. – 2019. – P. 1028–1038. – DOI: 10.5277/PPMP19024.

11. Badalov F.A., Almatov I.M., Alimov D. Sh. Alunit ma’danlarini qayta ishlash bo‘yicha jahon tajribasi va O‘zbekiston sharoitida ularni qo‘llash istiqbollari // Zarafshon vohasini kompleks innovatsion rivojlantirish yutuqlari, muammolari va istiqbollari: V xalqaro ilmiy-amaliy anjuman materiallari. – 2024.
12. Almatov I.M., Bekpulatov J.M., Alimov D. Sh. Go‘shsoy koni alunit ma’dani texnologik namunalarining flotatsion boyitiluvchanligini tadqiq qilish // Sanoatda Raqamli Texnologiyalar. – 2025. – T. 3, № 4. – P. 89–93. – DOI: 10.70769/3030–3214.SRT.3.4.2025.12.
13. Almatov I.M., Usenov R.B., Makhmarezhabov D.B. Comprehensive processing methods for oil shale from the Aktau deposit (Uzbekistan) // Obogashchenie Rud. – 2023. – № 6. – P. 28–32. – DOI: 10.17580/or.2023.06.05.

Статья поступила в редакцию: 25.09.2026
Статья принята к публикации: 13.10.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 622.271.326

DOI: 10.32743/UniTech.2026.151.10.23550

Условия и особенности проявления горного давления на руднике «Зармитан»

Буриев Шукурулла Убайдуллаевич
ст. преп. кафедра разработки и переработки руд редких и радиоактивных металлов
Навоийский государственный горно-технологический университет
Республика Узбекистан, г. Навои
E-mail: buriyevshukurullo19880312@mail.ru

Жиянов Абдунор Бобокулович
PhD, доц.
кафедра разработки и переработки руд редких и радиоактивных металлов, Навоийский государственный горно-технологический университет
Республика Узбекистан, г. Навои
E-mail: abdunor_jiyanov@mail.ru

Авазов Адхамбек Нуриллаевич
ассистент кафедра разработки и переработки руд редких и радиоактивных металлов
Навоийский государственный горно-технологический университет
Республика Узбекистан, г. Навои
E-mail: adxambekavazov@gmail.com

Conditions and characteristics of rock-pressure manifestations at the Zarmitan mine

Buriyev Shukurulla Ubaydullayevich
senior Lecturer
Department of Mining and Processing of Rare and Radioactive Metal Ores, Navoi State University of Mining and Technologies
Uzbekistan, Navoi

Jiyanov Abdunor Bobokulovich
PhD, Associate Professor
Department of Mining and Processing of Rare and Radioactive Metal Ores, Navoi State University of Mining and Technologies
Uzbekistan, Navoi

Библиографическое описание: Буриев Ш.У., Жиянов А.Б., Авазов А.Н. Условия и особенности проявления горного давления на руднике «Зармитан» // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23550

Avazov Adkhambek Nurillaevich
Assistant
Department of Mining and Processing of Rare and Radioactive Metal Ores, Navoi State University of Mining and Technologies
Uzbekistan, Navoi

Аннотация

В статье рассмотрены условия проявления горного давления при подземной разработке Зармитанского месторождения. Цель исследования — сопоставить активность акустической эмиссии (АЭ), показатель амплитудного распределения и зарегистрированные звуковые явления для оценки возможностей оперативного наблюдения за деформированием массива. Использованы результаты семи тестовых измерений прибором СБ-32М (САПФИР) в очистных и полевых выработках, а также сведения о геологических и горнотехнических условиях. Датчик устанавливался в шпур диаметром 40–46 мм на глубину до 1,5 м; продолжительность измерения, указанная в исходной методике, составляла 20 минут. Активность приведена к 15-секундному интервалу, для графиков использован минутный счет импульсов. По исходной таблице два подробно рассмотренных измерения относятся к блоку 70120а–70121а: на первом подэтаже получены значения N_{15} сек = 11,1 и b′ = 3,3, на втором — N_{15} сек = 3,8 и b′ = 2,4. Во втором измерении отмечен щелчок. Сопоставление показывает, что средняя активность не описывает всех особенностей зарегистрированного акустического процесса. Наблюдения обосновывают дальнейшее совместное изучение активности, амплитудного состава и состояния выработок. Вместе с тем отсутствие первичных каналовых записей, оценки погрешностей и независимой проверки не позволяет подтвердить достижение предельного состояния либо прогнозирование горного удара. Рассматриваемые пороги являются предварительными; для их проверки необходимы повторные наблюдения, включая участки без динамических проявлений.

Abstract

The paper examines rock-pressure manifestations during underground mining at the Zarmitan deposit. The objective is to compare acoustic-emission (AE) activity, the amplitude-distribution parameter, and recorded audible events to assess the potential of operational observation of rock-mass deformation. The study uses seven test measurements obtained with the SB-32M (SAPFIR) instrument in stoping and field workings, together with geological and mining information. The sensor was installed in a 40–46 mm borehole at a depth of up to 1.5 m; the original methodology specifies a measurement duration of 20 minutes. Activity is expressed as the mean count per 15 seconds, whereas the plots show counts per minute. According to the original table, the two measurements discussed in detail belong to block 70120a–70121a. Their reported values are N_{15} sec = 11.1 and b′ = 3.3 at sublevel 1, and N_{15} sec = 3.8 and b′ = 2.4 at sublevel 2, where a click was recorded. The comparison indicates that mean activity alone does not describe all features of the recorded acoustic process. However, missing primary channel records, uncertainty estimates, and independent validation prevent confirmation of a limiting state or demonstrated rockburst prediction. The thresholds remain preliminary and require repeated observations, including locations without dynamic manifestations.

Ключевые слова: Зармитанское месторождение, горное давление, тектонические нарушения, акустическая эмиссия, устойчивость массива, показатель b′, удароопасность.

Keywords: Zarmitan deposit, rock pressure, tectonic disturbances, acoustic emission, rock-mass stability, amplitude-distribution parameter b′, rockburst hazard.

Финансирование: Авторы выражают искреннюю благодарность администрации Зармитанского рудника Южного рудоуправления “Навоийского горно-металлургического комбината” за содействие в проведении исследований, предоставление необходимой производственной и геологической информации, а также за оказанную организационную поддержку. Исследование выполнено без привлечения специального внешнего финансирования.

Funding: The authors express their sincere gratitude to the Administration of the Zarmitan Mine of the Southern Ore Administration of “Navoi Mining and Metallurgical Company” for their assistance in conducting the research, providing the necessary operational and geological information, and offering organizational support. This research was conducted without any specific external funding.

Введение

Увеличение глубины разработки золоторудных месторождений сопровождается усложнением геомеханических условий ведения горных работ. Для Зармитанского месторождения характерны тектоническая нарушенность и трещиноватость вмещающего массива. Деформационно-прочностные характеристики отдельных участков зависят от литологического состава, состояния разрывных нарушений и ориентировки систем трещин относительно обнажений. Количественная зависимость нарушенности от глубины в настоящей выборке не исследовалась. [5,6]

На руднике «Зармитан» применяются системы разработки с оставлением открытого выработанного пространства и охранных целиков. С увеличением глубины разработки и пролета выработанного пространства происходит увеличение напряжений в передовой по падению части массива, а наличие отставания и опережения отдельных очистных блоков способствует дополнительной концентрации и неравномерности напряжений. В результате наблюдаются как статические, так и динамические формы проявления горного давления, включая разрушение межблоковых и межэтажных целиков, вывалы вмещающих пород, заколообразование, деформацию стенок шпуров и скважин, стреляния и звуковые явления при проведении горных выработок.

В связи с этим особое значение приобретает своевременная оценка напряженного состояния массива и выявление участков, склонных к динамическим проявлениям горного давления. Одним из исследуемых в условиях Зармитанского месторождения методов является метод акустической эмиссии (АЭ), позволяющий регистрировать импульсы, возникающие в процессе деформирования и микроразрушения горных пород.

Цель исследования — сопоставить среднюю активность акустической эмиссии, показатель амплитудного распределения и зарегистрированные звуковые проявления на исследованных участках рудника «Зармитан», оценить возможности их совместного использования для оперативного наблюдения за деформированием массива и определить ограничения предварительных диагностических критериев.

Материалы и методы

Материал исследования включает семь тестовых измерений акустической эмиссии, выполненных 28–29 сентября 2025 г. прибором СБ-32М (САПФИР) в очистных и полевых выработках рудника «Зармитан» (табл. 1). В исходной статье представлены сводные показатели и два растровых графика; первичные журналы, каналовые счетчики и полные временные ряды к ней не приложены. Поэтому ниже разграничены наблюдаемые результаты, пересчет единиц и ограничения их интерпретации.

Для описания активности используется единое обозначение N_{15} сек — среднее число зарегистрированных импульсов за 15 с. N_1 мин,j обозначает число импульсов в j-м минутном интервале, а среднее за весь период значение обозначено как $\langle N_1$ мин$\rangle$. При T минутах эффективной регистрации и суммарном счете a_1 выполняются соотношения: N_{15} сек = $a_1/(4T)$; $\langle N_1$ мин$\rangle = a_1/T = 4N_{15}$ сек. Для m полных минут: N_{15} сек = $(\Sigma_j N_1$ мин,j$)/(4m)$. Это пересчет средней активности; отдельные 15-секундные отсчеты внутри минуты не обязаны равняться четверти минутного счета. [1]

Показатель амплитудного распределения во всех разделах обозначен b′. В опубликованной двухпороговой методике для СБ-32М он записан как $b = a_1/a_2$, где a_1 и a_2 — числа импульсов, превышающих соответственно нижний и верхний амплитудные пороги за один период регистрации. Для этой схемы здесь используется запись $b' = a_1/a_2$, а на графиках — $1/b' = a_2/a_1$. Она характеризует долю импульсов выше второго порога среди импульсов выше первого. Амплитуда относится к зарегистрированному сигналу датчика; без калибровки ее нельзя отождествлять с энергией источника. Обозначение b′ не означает наклон регрессии амплитудного распределения. Применимость двухпороговой схемы к исходным записям требует подтверждения по журналам. [1]

Воспроизводимость регистрации и ограничения

В опубликованном описании СБ-32М приведена полоса регистрации 10–40 кГц [1]. Это характеристика литературной методики; фактическая полоса примененного прибора в журнале исследования не документирована. Не приведены численные амплитудные пороги, единицы их задания, усиление, фильтры, правила выделения импульса, подавление помех и сведения о калибровке. Подменять эти данные типовыми настройками нельзя.

Объем суммарной выборки импульсов определяется счетом a_1, а выборки второго канала — a_2. Эти счета для семи замеров отсутствуют, поэтому показатели b′ сохранены как исходные сводные значения без независимого пересчета. Размеры выборок, доверительные интервалы и приборная погрешность численно не устанавливаются. Непосредственных записей амплитуд и энергий отдельных импульсов в представленных материалах нет.

По исходному описанию датчик устанавливался в шпур диаметром 40–46 мм на глубину до 1,5 м с целью обеспечить контакт с породой вне нарушенной приконтурной области. Контакт проверялся ударным возбуждением акустических импульсов на стенке выработки. Сам по себе такой тест не является метрологической калибровкой и не подтверждает, что датчик во всех точках находился за пределами зоны трещиноватости.

В исходной методике указан ориентировочный интервал наблюдений 1–5 ч после шпуровой отбойки и длительность одного измерения 20 мин. Однако в таблице 1 имеются замеры через 9 ч 20 мин и более 24 ч после взрыва; их нельзя считать выполненными в одинаковых поствзрывных условиях. Рисунки 1 и 2 показывают только десять минутных отсчетов каждого измерения. Длительность и эффективное время регистрации каждого полного замера требуют проверки по журналам; квазистационарность процесса по одному времени после взрыва не устанавливается.

Согласно исходной таблице, измерения с N_{15} сек = 11,1; $b' = 3,3$ и N_{15} сек = 3,8; $b' = 2,4$ относятся к блоку 70120а–70121а. Первое выполнено на подэтаже 1, левом фланге, через 3 ч 20 мин после взрыва, второе — на подэтаже 2, правом фланге, через 3 ч 32 мин. Предварительные ориентиры из исходной статьи сохранены для исследовательского сопоставления: N_{15} сек ≥ 3 соответствует средней минутной активности $\langle N_1$ мин$\rangle \geq 12$; при $b' > 0$ условие $b' \leq 4$ равносильно $1/b' \geq 0,25$. Для двухпороговой схемы отношение определено при $a_2 > 0$; при отсутствии импульсов второго канала конечное значение b' не рассчитывается. Превышение одной пороговой линии на графике не является самостоятельным доказательством категории «опасно». Пороговые значения для Зармитана независимо не проверены и не используются здесь для эксплуатационного районирования.

Таблица 1. Сводные параметры акустической эмиссии по тестовым измерениям на руднике «Зармитан»

Дата замера	Место замера		N_{15} сек[1] имп./15 с	b'[2]	Время после ВР	Комментарии
28.09.2025	Блок 70120а 70121а	Подэтаж 1 гор. 480 м	129,7	1,8	2:00	Не указан
		Подэтаж 2 гор.495 м	2,5	5,6	9:20	Не указан
29.09.2025	Блок 70120а 70121а	Подэтаж 2 левый фланг	3,2	2,7	3:22	жила посреди забоя
		Подэтаж 2 правый фланг	3,8	2,4	3:32	щелчок во время замера
		Подэтаж 1, левый фланг	11,1	3,3	3:20	звук в породе
	Гор. 480 м, полевой штрек		101,6	37,0	3:45	После взрыва в забое отмечены щелчки и стреляние. По исходному комментарию преобладали импульсы небольшой амплитуды; каналовые записи отсутствуют.
	НТС, забой, гор. 470 м, шпур 1		68	19,2	>24 часов	Шпур пробурен перед замером; отмечены треск в массиве и смещение околошпуровой области к обнажению.

Примечания. ¹ Временная единица N в исходной таблице не указана; здесь принято N_{15} сек по исходной методике и согласованности двух графических фрагментов. Для остальных строк единицу и время регистрации необходимо подтвердить по журналам. ² Значения b′ сохранены из исходной таблицы, без независимого пересчета. Привязка двух графиков к блоку 70120а–70121а выполнена по таблице и также требует журнальной проверки. НТС-сокращение исходной записи, расшифровка не предоставлена. Пустые комментарии обозначены «Не указан».

Результаты и обсуждение

Сводная выборка включает семь измерений. Приведенные значения N_{15} сек изменяются от 2,5 до 129,7, а b′ - от 1,8 до 37,0. Для пяти строк отмечены звуковые либо визуальные явления; в двух строках комментарий отсутствует. Отсутствие записи не доказывает отсутствие динамических проявлений. Поскольку времена после взрыва и условия размещения датчика различаются, выборка не позволяет выделить влияние отдельного геологического или технологического фактора. [2,3]

Акустическая активность согласуется с возможным протеканием процессов микроразрушения, однако ее абсолютная величина зависит также от порогов регистрации, контакта датчика, затухания и технологических помех. Непосредственные измерения напряжений, деформаций или остаточной несущей способности для этих семи точек не представлены. Поэтому значения таблицы 1 не рассматриваются как подтверждение предельного состояния массива.

Анализ измерения в блоке 70120а–70121а, подэтаж 1

На подэтаже 1, левом фланге блока 70120а–70121а, через 3 ч 20 мин после взрыва указаны N_{15} сек = 11,1 и b′ = 3,3. В комментарии таблицы отмечен «звук в породе». На рис. 1 показан десятиминутный фрагмент наблюдения.

Графическое считывание минутного счета на рис. 1 дает последовательность приблизительно 29, 40, 31, 32, 51, 68, 56, 70, 38 и 30 импульсов. Ее сумма равна 445, среднее — 44,5 импульса/мин, а пересчет к 15 с дает $445/(4 \times 10) = 11{,}125 \approx 11{,}1$. Таким образом, графический фрагмент согласуется с единицей активности, принятой для таблицы. Этот расчет не заменяет проверку полного 20-минутного ряда.

В представленном фрагменте активность колеблется; длительная стационарность и стабильность напряженного состояния этим не доказаны. Для двухпороговой интерпретации b′ = 3,3 соответствует интегральному отношению $1/b' \approx 0{,}303$. Среднее арифметическое минутных значений $1/b'_j$ вообще не равно обратной величине интегрального b′: последняя рассчитывается по суммарным счетам каналов. Для проверки необходимы a_1,j и a_2,j.

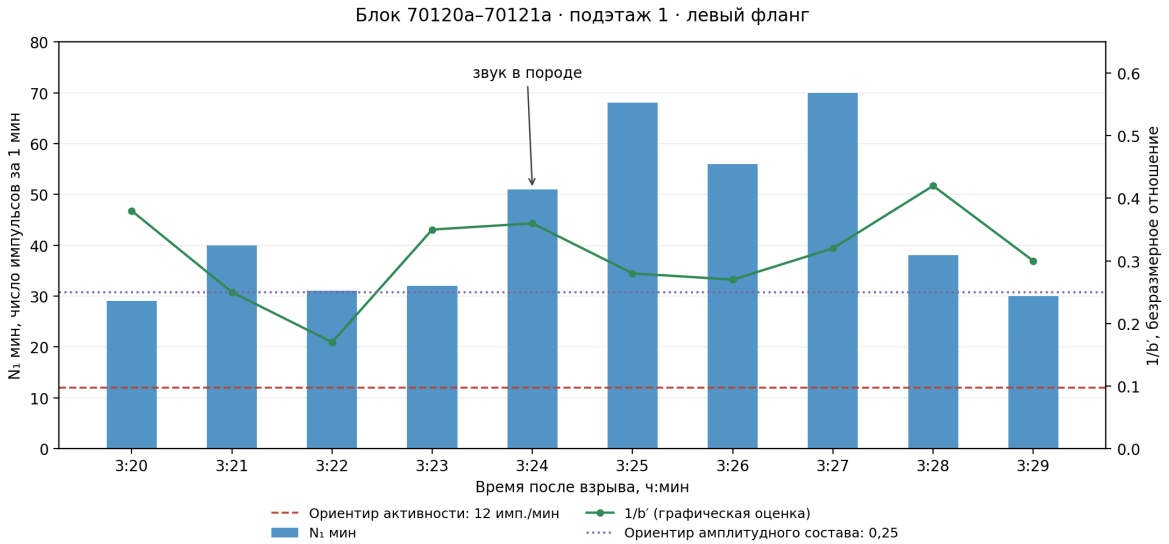


Рисунок 1. АЭ в блоке 70120а–70121а, подэтаж 1, левый фланг: десять минутных отсчетов, начиная с 3 ч 20 мин после взрыва. График восстановлен по исходному изображению; линии 12 импульсов/мин и 0,25 обозначают предварительные ориентиры. Положение пометки «звук в породе» перенесено из исходного графика

Анализ измерения в блоке 70120а–70121а, подэтаж 2

На подэтаже 2, правом фланге того же блока, измерение начато через 3 ч 32 мин после взрывных работ. В таблице указаны N_{15} сек = 3,8 и b′ = 2,4, а в комментарии отмечен щелчок во время измерения.

По рис. 2 считываются минутные значения приблизительно 20, 13, 15, 9, 13, 16, 20, 10, 9 и 27 импульсов. Сумма равна 152, среднее — 15,2 импульса/мин; после пересчета получаем 152/(4 × 10) = 3,8 импульса за 15 с. Значение b′ = 2,4 соответствует интегральному отношению 1/b′ ≈ 0,417 при применимости двухпороговой схемы. Проверить его независимо без исходных каналовых счетов невозможно.

На исходном графике перед пометкой «щелчок» наблюдается увеличение активности и отношения 1/b′, после нее — снижение обоих показателей. Это временное соседство зарегистрированного звука и изменения АЭ. Без синхронизированной записи события, локализации источника и независимого контроля массива оно не подтверждает причинную связь или успешный прогноз горного удара. Утверждение о росте энергии импульсов заменено описанием изменения амплитудного состава, поскольку калиброванные энергетические данные отсутствуют.

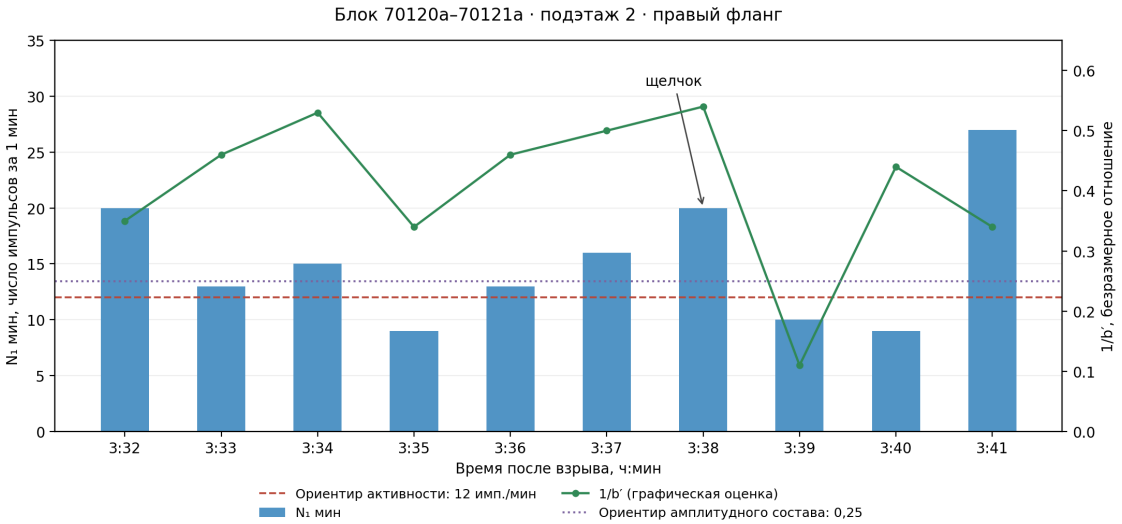


Рисунок 2. АЭ в блоке 70120а–70121а, подэтаж 2, правый фланг: десять минутных отсчетов, начиная с 3 ч 32 мин после взрыва

Сопоставление двух измерений показывает различие средней активности и амплитудного состава: на первом подэтаже N_{15} сек = 11,1 и b′ = 3,3, на втором — 3,8 и 2,4. При двухпороговой интерпретации меньшему b′ соответствует большая относительная доля импульсов выше второго порога. Это не означает, что абсолютное число таких импульсов во втором измерении больше: для этого сравнения нужны каналовые счета и одинаковые условия регистрации.

Совместное рассмотрение активности, амплитудного состава и наблюдаемых явлений дает более подробное описание акустического процесса, чем одна средняя активность. Однако диагностическая чувствительность, специфичность, вероятность ложной тревоги и время упреждения по данной выборке не определены. Ни один участок не получил независимо подтвержденную категорию удароопасности в рамках настоящего анализа.

Для проверки предварительных ориентиров необходима расширенная серия измерений в сопоставимых горнотехнических условиях, включая точки без зарегистрированных динамических проявлений. Требуется синхронное сопоставление с измерениями деформаций или напряжений, микросейсмическими наблюдениями либо документированными событиями. Методические подходы к такой проверке обсуждаются в работах [7–11]; их результаты не заменяют локальную валидацию для Зармитана. [3,4,8,10,7]

Геологические сведения о тектонической нарушенности и трещиноватости, а также данные о системах разработки и открытом выработанном пространстве задают контекст интерпретации наблюдений. Влияние этих факторов рассматривается как геомеханическая предпосылка, а не как количественно установленная зависимость по семи замерам. [5,6]

Практический результат исследования заключается в представлении сводных АЭ-наблюдений и проверке согласованности временных единиц для двух графических фрагментов. Прибор дает возможность регистрировать акустические изменения в выработках; сравнительная эффективность относительно дискования керна и других методов в настоящей работе не измерялась.

Основные ограничения — небольшая неоднородная выборка, отсутствие первичных каналовых записей, неполные временные ряды, неизвестные настройки регистрации и отсутствие независимого подтверждения состояния массива. Эти ограничения исключают

вывод о разработанном методе прогнозирования горных ударов. Результаты следует использовать как основание для организации дальнейших наблюдений и проверки предварительных критериев.

Заключение

1. Обобщены семь тестовых измерений акустической эмиссии на руднике «Зармитан». Геологические и горнотехнические сведения задают условия интерпретации, но количественная связь измеренных показателей с глубиной, трещиноватостью или напряжениями по этой выборке не установлена.

2. Унифицированы обозначения средней активности N_{15} сек и минутного счета N_1 мин. Пересчет десятиминутных фрагментов дает 11,125 ≈ 11,1 и 3,8 импульса за 15 с, что согласуется с таблицей для двух подробно рассмотренных измерений блока 70120a–70121a. Полные ряды и идентификация участков требуют сверки с журналами.

3. Различия активности и показателя b′ вместе с зарегистрированным щелчком обосновывают дальнейшее совместное изучение параметров АЭ и состояния выработок. Эти наблюдения не подтверждают достижение предельного состояния, категорию удароопасности или успешное прогнозирование горного удара.

4. Для практического применения предварительных порогов необходимы восстановление исходных счетов и настроек прибора, оценка погрешностей, расширение наблюдений и независимая проверка на участках с динамическими проявлениями и без них. До такой проверки пороги рассматриваются исключительно как исследовательские ориентиры.

Список литературы

1. Еременко А.А., Филиппов В.Н., Смирнов С.М. Оценка геодинамической активности массива горных пород в шахтном поле Казского месторождения // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2021. – Т. 8, № 1. – С. 211–217. – DOI: 10.15372/FPVGN2021080133.
2. Назаров З.С., Джиянов А.Б., Буриев Ш.У. Теоретическое исследование геомеханических характеристик процессов запредельного деформирования массива в окрестности забоя горной выработки // Горный вестник Узбекистана. – 2025. – № 3 (102). – С. 4–10.
3. Назаров З.С., Джиянов А.Б., Шарипов Л.О., Назаров А.З. Расчёт массива борта карьера методом конечных элементов в программном комплексе Midas GTS NX // Наука и образование в Каракалпакстане. – 2023. – № 1/2 (31). – С. 29–34.
4. Назаров З.С., Джиянов А.Б., Шарипов Л.О., Суннатуллоев Ш. Применение геомеханической классификации профессора Д. Лобшира для глубинного зонирования борта рудника Амантау // E3S Web of Conferences. GEOTECH. – 2023. – Т. 417.
5. Саййидкосимов С.С., Казаков А.Н., Хакбердиев М.Р., Рахимова М.Х. Оценка геомеханических условий разработки золоторудного месторождения Чармитан // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 3. – С. 29–39. – DOI: 10.25018/0236_1493_2023_3_0_29.

6. Саййидкосимов С.С., Казаков А.Н. Forecast of probability of shock hazard in conditions of underground development of Zarmitan gold deposit zones // Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses. CRC Press. – 2018. – P. 499–504.
7. Gao F., Yang L., Lu Z., Wu R., Liu W., Xi C. Real-time forecasting of brittle rock failure: a robust acoustic emission approach validated on a large experimental dataset // GeoEnergy Communications. – 2026. – Т. 2, № 1. – DOI: 10.1007/s44421-025-00014-1.
8. Liang Z., Liu X., Zhang Y., Tang C. Analysis of precursors prior to rock burst in granite tunnel using acoustic emission and far infrared monitoring // Mathematical Problems in Engineering. – 2013. – Art. 214340. – DOI: 10.1155/2013/214340.
9. Meng F., Zhou H., Wang Z., Zhang L., Kong L., Li S., Zhang C. Experimental study on the prediction of rockburst hazards induced by dynamic structural plane shearing in deeply buried hard rock tunnels // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2016. – Т. 86. – P. 210–223. – DOI: 10.1016/j.ijrmms.2016.04.013.
10. Voza A., Valguarnera L., Marrazzo R., Ascari G., Boldini D. A new in situ test for the assessment of the rock-burst alarm threshold during tunnelling // Rock Mechanics and Rock Engineering. – 2023. – Т. 56. – P. 1645–1661. – DOI: 10.1007/s00603-022-03152-8.
11. Zhang Z. z., Gao F., Shang X.-j. Rock burst proneness prediction by acoustic emission test during rock deformation // Journal of Central South University. – 2014. – Т. 21, № 1. – P. 373–380. – DOI: 10.1007/s11771-014-1950-3.

References

1. Eremenko A.A., Filippov V.N., Smirnov S.M. Assessment of geodynamic activity of the rock mass in the mine field of the Kazsky deposit // Fundamental and Applied Problems of Mining Sciences. – 2021. – Vol. 8, No. 1. – P. 211–217. – DOI: 10.15372/FPVGN2021080133.
2. Nazarov Z.S., Jiyanov A.B., Buriyev Sh.U. Theoretical investigation of the characteristics of geomechanical processes of post-limit deformation in the vicinity of the excavation face // Mining Bulletin of Uzbekistan. – 2025. – No. 3 (102). – P. 4–10.
3. Nazarov Z.S., Jiyanov A.B., Sharipov L.O., Nazarov A.Z. Calculation of the Pit Wall Mass Using the Finite Element Method in Midas GTS NX Software // Science and Education in Karakalpakstan. – 2023. – No. 1/2 (31). – P. 29–34.
4. Nazarov Z.S., Jiyanov A.B., Sharipov L.O., Sunnatulloev Sh. Application of Professor D. Lobshire’s Geomechanical Classification for In-Depth Zoning of the Amantaytau Mine Board // E3S Web of Conferences. GEOTECH. – 2023. – Vol. 417.
5. Sajjidkosimov S.S., Kazakov A.N., Hakberdiev M.R., Rahimova M.H. Geomechanical conditions of gold mining in Charmitan Mine // MIAB. Mining Inf. Anal. Bull. – 2023. – No. 3. – P. 29–39. – DOI: 10.25018/0236_1493_2023_3_0_29.
6. Sajjidkosimov S.S., Kazakov A.N. Forecast of probability of shock hazard in conditions of underground development of Zarmitan gold deposit zones // Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses. CRC Press. – 2018. – P. 499–504.

7. Gao F., Yang L., Lu Z., Wu R., Liu W., Xi C. Real-time forecasting of brittle rock failure: a robust acoustic emission approach validated on a large experimental dataset // GeoEnergy Communications. – 2026. – Vol. 2, No. 1. – DOI: 10.1007/s44421-025-00014-1.
8. Liang Z., Liu X., Zhang Y., Tang C. Analysis of Precursors Prior to Rock Burst in Granite Tunnel Using Acoustic Emission and Far Infrared Monitoring // Mathematical Problems in Engineering. – 2013. – Art. 214340. – DOI: 10.1155/2013/214340.
9. Meng F., Zhou H., Wang Z., Zhang L., Kong L., Li S., Zhang C. Experimental study on the prediction of rockburst hazards induced by dynamic structural plane shearing in deeply buried hard rock tunnels // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2016. – Vol. 86. – P. 210–223. – DOI: 10.1016/j.ijrmms.2016.04.013.
10. Voza A., Valguarnera L., Marrazzo R., Ascari G., Boldini D. A New In Situ Test for the Assessment of the Rock-Burst Alarm Threshold During Tunnelling // Rock Mechanics and Rock Engineering. – 2023. – Vol. 56. – P. 1645–1661. – DOI: 10.1007/s00603-022-03152-8.
11. Zhang Z. z., Gao F., Shang X.-j. Rock burst proneness prediction by acoustic emission test during rock deformation // Journal of Central South University. – 2014. – Vol. 21, No. 1. – P. 373–380. – DOI: 10.1007/s11771-014-1950-3.

Статья поступила в редакцию: 12.09.2026
Статья принята к публикации: 18.09.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 669.273.3

Комплексная переработка техногенных отходов гидрометаллургических заводов с извлечением благородных и редких металлов

Вохидов Бахриддин Рахмидинович
проф. кафедры Металлургии
Навоийский государственный горно-технологический университет
Республика Узбекистан, г. Навои
ORCID ID: 0000-0002-0819-6752
E-mail: bakhriddin.vokhidov@mail.ru
Рустамов Исломжон Илхомович
помощник ректора, Университет информационных технологий и менеджмента
Республика Узбекистан, г. Карши
ORCID ID: 0009-0005-3508-806X
E-mail: islom4744740@gmail.com
Мамараимов Гайрат Фарходович
доц. кафедры Металлургия
Навоийский государственный горно-технологический университет
Республика Узбекистан, г. Навои
Боймуродов Нажмиддин Абдукодирович
доц. кафедры Геология и горное дело
Каршинский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Карши
ORCID ID: 0009-0007-7820-7799
E-mail: najmiddinboy-94@mail.ru

Comprehensive processing of technogenic waste from hydrometallurgical plants with the recovery of noble and rare metals

Vokhidov Bakhriddin Rakhmidinovich
professor of the Department of Metallurgy
Navoi State University of Mining and Technologies
Uzbekistan, Navoi
Rustamov Islomjon Ilkhomovich
Assistant
to the Rector, University of Information Technologies and Management
Uzbekistan, Qarshi
Mamarayimov Gayrat Farkhodovich
Associate Professor of the Department of Metallurgy
Navoi State University of Mining and Technologies
Uzbekistan, Navoi

Библиографическое описание: Комплексная переработка техногенных отходов гидрометаллургических заводов с извлечением благородных и редких металлов // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Вохидов Б.Р. [и др.]. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23437

Boymurodov Najmiddin Abdukodirovich
Associate Professor of the Department of Geology and Mining
Karshi State Technical University
Uzbekistan, Karshi

Аннотация

В статье представлены результаты исследований по разработке комплексной технологии переработки техногенных отходов гидрометаллургических заводов с целью извлечения благородных и редких металлов. Объектом исследования являлись хвосты переработки золотосодержащих сульфидных руд, накопленные в хвостохранилищах гидрометаллургических производств. Химический и минералогический состав исходного материала изучали методами пробирного анализа, атомно-эмиссионной спектроскопии, сканирующей электронной микроскопии с энергодисперсионным анализом и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. На основании полученных данных исследованы следующие процессы: флотационное и гравитационное обогащение, спекающий обжиг с карбонатом натрия, водное и кислотное выщелачивание, а также сорбционное цианирование.

Установлено, что наиболее эффективные режимы флотации обеспечивают извлечение золота до 46,70 %, серебра до 40,16 %, вольфрама до 30,52 % и ванадия до 27,56 % в коллективный концентрат. Гравитационное обогащение позволяет дополнительно концентрировать вольфрам и благородные металлы в малом объёме продукта. Последующая термическая и гидрометаллургическая обработка обеспечивает перевод вольфрама и ванадия в растворимые соединения и создаёт условия для последующего извлечения золота и серебра. Предложенная комбинированная схема позволяет комплексно использовать техногенное сырьё, расширить минерально-сырьевую базу предприятия и снизить экологическую нагрузку.

Abstract

The article presents the results of research aimed at developing an integrated technology for processing technogenic waste from hydrometallurgical plants in order to recover precious and rare metals. The study focused on tailings generated during the processing of gold-bearing sulfide ores and accumulated in hydrometallurgical tailing storage facilities. The chemical and mineralogical composition of the initial material was investigated using fire assay, atomic emission spectroscopy, scanning electron microscopy with energy-dispersive analysis, and inductively coupled plasma mass spectrometry. Based on the obtained data, flotation and gravity concentration, sodium-carbonate roasting, water and acid leaching, and sorption cyanidation were investigated. The most effective flotation conditions provided recoveries of up to 46.70 % for gold, 40.16 % for silver, 30.52 % for tungsten, and 27.56 % for vanadium into a collective concentrate. Gravity concentration additionally enabled tungsten and precious metals to be concentrated into a low-mass product. Subsequent thermal and hydrometallurgical treatment promoted the conversion of tungsten and vanadium into soluble compounds and created favorable conditions for the further recovery of gold and silver. The proposed combined flowsheet enables more complete utilization of technogenic raw materials, expansion of the enterprise’s mineral resource base, and reduction of environmental impacts.

Ключевые слова: техногенные отходы, хвосты гидрометаллургических заводов, благородные металлы, редкие металлы, золото, серебро, вольфрам, ванадий, флотация, гравитационное обогащение, спекающий обжиг, выщелачивание, сорбционное цианирование, комплексная переработка.

Keywords: technogenic waste, hydrometallurgical plant tailings, precious metals, rare metals, gold, silver, tungsten, vanadium, flotation, gravity concentration, roasting, leaching, sorption cyanidation, integrated processing.

Введение

Техногенные минеральные образования в настоящее время рассматриваются как дополнительный источник благородных, цветных и редких металлов, особенно в условиях постепенного истощения легкообогатимых природных руд. Центрально-Кызылкумский горнорудный район Узбекистана характеризуется значительными объёмами накопленного техногенного сырья. По данным опубликованных исследований, в результате многолетней эксплуатации месторождений Центрально-Кызылкумского горнорудного района сформированы значительные объёмы техногенного минерального сырья и отходов [8; 10].

Значительная часть этих материалов представлена хвостами обогащения в гидрометаллургической переработке золотосодержащих руд, в которых сохраняются остаточные количества благородных, редких и сопутствующих металлов. Вовлечение таких отходов во вторичную переработку позволяет не только расширить минерально-сырьевую базу предприятий, но и снизить экологическую нагрузку, связанную с длительным хранением техногенных материалов [8; 10]. Современная промышленная практика НГМК также подтверждает актуальность данного направления: гидрометаллургический завод № 7 специализируется на переработке техногенного сырья и рассчитан на переработку порядка 15–16 млн т отходов в год.

Особый интерес представляют хвосты переработки сульфидных золотосодержащих руд, содержащие остаточные количества золота и серебра, а также вольфрам, ванадий, палладий и другие ценные компоненты. Исследования показывают перспективность сочетания гравитационного и флотационного обогащения с последующей термической и гидрометаллургической переработкой для более полного извлечения ценных компонентов из такого сырья [8; 6; 10].

Цель исследования заключается в разработке и экспериментальном обосновании комплексной технологии переработки техногенных отходов гидрометаллургических заводов, обеспечивающей последовательное извлечение благородных и редких металлов с использованием флотационного и гравитационного обогащения, спекающего обжига, водного и кислотного выщелачивания и сорбционного цианирования.

Материалы и методы

Объектом исследования являлись пробы техногенных отходов гидрометаллургических заводов, представляющие собой твёрдые остатки переработки золотосодержащих сульфидных руд. Исходные пробы отбирали из хвостохранилища и использовали для определения химического, минералогического и технологического состава материала.

Химический и минералогический состав исследовали с применением пробирного анализа, атомно-эмиссионной спектроскопии, сканирующей электронной микроскопии с энергодисперсионным анализом на приборе JEOL JSM-IT200, а также масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. Полуколичественный спектральный анализ использовали для выявления благородных, редких и сопутствующих элементов в составе техногенного сырья.

Технологические исследования включали флотационное и гравитационное обогащение, спекающий обжиг, водное и кислотное выщелачивание, а также сорбционное цианирование. Перед флотацией материал измельчали в лабораторной шаровой мельнице до крупности 80 % класса –0,074 мм. Флотационные опыты проводили в лабораторных машинах с камерой объёмом 3 л с использованием сульфата меди, ксантогената калия и пенообразователя Т-92. Было выполнено пять серий опытов с изменением расхода реагентов и продолжительности отдельных стадий процесса.

Гравитационное обогащение выполняли на центробежных концентраторах Knelson по двухстадиальной схеме при крупности материала 80 % класса —0,074 мм, расходе воды 3 л/мин., центробежном ускорении 90 G и продолжительности концентрации 10 мин. на каждой стадии.

Полученные флотационные и гравитационные концентраты подвергали спекающему обжигу с добавлением 5 % карбоната натрия при температуре 650–700 °C в течение 4 часов. После обжига проводили водное выщелачивание при 80–85 °C, а затем кислотную обработку серной кислотой. Остаточный кек после кислотного выщелачивания направляли на сорбционное цианирование с целью извлечения золота и серебра.

Эффективность технологических операций оценивали по выходу концентратов, содержанию и степени извлечения золота, серебра, вольфрама и ванадия. Полученные результаты использовали для обоснования последовательности операций в комплексной технологической схеме переработки техногенного сырья.

Результаты и обсуждение

Проведённые исследования позволили установить особенности вещественного состава техногенных отходов, определить эффективность флотационного и гравитационного обогащения и обосновать последовательность последующих пирометаллургических и гидрометаллургических операций. Полученные результаты рассмотрены с позиции комплексного извлечения золота, серебра, вольфрама и ванадия из техногенного минерального сырья.

1. Результаты минералогического анализа

Полученные результаты свидетельствуют о сложном поликомпонентном составе исследуемых отходов. Наличие золота и серебра в ассоциации с сульфидными и железосодержащими фазами указывает на необходимость предварительного раскрытия минеральных сростков перед гидрометаллургической переработкой. Одновременно присутствие вольфрама и ванадия определяет целесообразность комплексного подхода, предусматривающего не только извлечение благородных металлов, но и получение

дополнительных продуктов из редких и сопутствующих компонентов. Перспективность комплексной переработки техногенного сырья для извлечения благородных и редких металлов отмечалась также в ранее опубликованных исследованиях [8; 12; 6].

2. Флотационное обогащение

Проведённые флотационные исследования показали, что наиболее высокие показатели комплексного извлечения ценных компонентов получены в опытах № 4 и № 5. В опыте № 4 извлечение золота составило 46,70 %, серебра — 37,35 %, вольфрама — 28,02 % и ванадия — 24,71 %. В опыте № 5 извлечение серебра увеличилось до 40,16 %, вольфрама — до 30,52 %, а ванадия — до 27,56 %.

Таблица 1. Результаты флотационного обогащения хвостов гидрометаллургических заводов

Наименование продуктов	Вес, гр.	Выход, %	Содержание, г/т				Извлечение, %			
			Au	Ag	W	V	Au	Ag	W	V
Опыт № 4										
Концентрат 1	70,00	7,00	1,50	2,50	10,20	159,30	23,86	14,34	11,14	9,33
Концентрат 2	66,00	6,60	0,95	2,42	9,20	155,60	14,25	13,09	9,47	8,60
Концентрат 3	54,00	5,40	0,7	2,24	8,80	150,00	8,59	9,91	7,41	6,78
Объедин.й концентрат	**190,00**	**19,00**	**1,08**	**2,40**	**9,45**	**155,37**	**46,70**	**37,35**	**28,02**	**24,71**
Хвосты	810,00	81,00	0,29	0,94	5,70	111,05	53,30	62,65	71,98	75,29
Исх. материал	1000,00	100,00	0,44	1,22	6,41	119,47	100,00	100,00	100,00	100,00
Опыт № 5										
Концентрат 1	76,00	7,60	0,95	2,60	10,50	162,00	16,41	16,20	12,45	10,31
Концентрат 2	74,00	7,40	0,89	2,21	9,60	159,00	14,97	13,40	11,08	9,85
Концентрат 3	56,00	5,60	0,68	2,30	8,00	158,00	8,65	10,56	6,99	7,41
Объедин.й концентрат	**206,00**	**20,60**	**0,86**	**2,38**	**9,50**	**159,83**	**40,03**	**40,16**	**30,52**	**27,56**
Хвосты	794,00	79,40	0,33	0,92	5,61	109,00	59,97	59,84	69,48	72,44
Исх. материал	1000,00	100,00	0,44	1,22	6,41	119,47	100,00	100,00	100,00	100,00

Сопоставление результатов опытов № 4 и № 5 показывает, что изменение режима флотации по-разному влияет на распределение отдельных ценных компонентов. В опыте № 4 достигнуто максимальное извлечение золота — 46,70 %, тогда как в опыте № 5 получены более высокие показатели извлечения серебра, вольфрама и ванадия. Следовательно, оптимальный режим флотации следует выбирать с учётом комплексного извлечения всех ценных компонентов, а не только одного металла. Полученные результаты подтверждают целесообразность использования флотации как предварительной стадии комплексной переработки техногенного сырья [8; 12].

3. Гравитационное обогащение

Для оценки возможности предварительного концентрирования тяжёлых минералов исследовано гравитационное обогащение техногенных отходов на центробежном концентраторе Knelson. Испытания проводили по двухстадиальной схеме при крупности материала 80 % класса –0,074 мм, расходе воды 3 л/мин., центробежном ускорении 90 G и продолжительности концентрации 10 мин. на каждой стадии.

Установлено, что гравитационный метод позволяет получить небольшой по массе концентрат с повышенным содержанием вольфрама и благородных металлов. При переработке усреднённой пробы № 2 выход объединённого концентрата составил 3,91 %. Содержание золота в концентрате достигло 0,73 г/т, серебра — 2,17 г/т, вольфрама — 27,42 г/т и ванадия — 133,30 г/т. Извлечение золота составило 5,41 %, серебра — 6,95 %, вольфрама — 15,54 % и ванадия — 4,36 %. Для других исследованных проб извлечение золота составляло 4,54–4,93 %.

Несмотря на более низкую степень извлечения ценных компонентов по сравнению с флотацией, гравитационное обогащение обеспечивает существенное концентрирование вольфрама в небольшом по массе продукте. Это позволяет рассматривать центробежную концентрацию как вспомогательную стадию предварительного выделения тяжёлых минералов перед последующей термической и гидрометаллургической переработкой.

Эффективность центробежной концентрации для предварительного выделения тяжёлых минералов, в том числе вольфрамсодержащих компонентов, подтверждается результатами современных исследований [6; 7].

4. Спекающий обжиг и выщелачивание

Полученные флотационные и гравитационные концентраты подвергали спекающему обжигу с добавлением 5 % карбоната натрия от массы материала. Обжиг проводили при температуре 650–700 °C в течение 4 ч. с периодическим перемешиванием шихты каждые 20–30 мин. Потери массы при обжиге составляли 7–9 % для флотационного концентрата и 6,5–7,3 % для гравитационного концентрата.

Рентгенофазовый анализ показал окисление сульфидных минералов железа с образованием гематита. Одновременно в огарке выявлено образование ванадата натрия в количестве 1,08 %, что свидетельствует о переходе части ванадия в водорастворимую форму. Кроме того, установлено присутствие кальцийсодержащих силикатных фаз, способных затруднять последующее вскрытие золота и обусловливать необходимость дополнительной кислотной обработки.

После обжига проводили водное выщелачивание при температуре 80–85 °C в течение не более 30 мин. При этом вольфрам переводился в раствор в форме вольфрамата натрия, а совместно с ним в раствор переходило 15–18 % ванадия. Это обстоятельство необходимо учитывать при последующем разделении вольфрама и ванадия в гидрометаллургической схеме [1; 5].

Полученные результаты подтверждают эффективность сочетания щелочного спекающего обжига и последующего выщелачивания для изменения фазового состояния вольфрама и ванадия и перевода их в растворимые соединения. Такой подход создаёт

технологические предпосылки для последовательного извлечения редких металлов и последующей переработки твёрдого остатка с целью извлечения благородных компонентов. Возможность извлечения ванадия из техногенного сырья рассматривается также в ранее опубликованных исследованиях [2; 11].

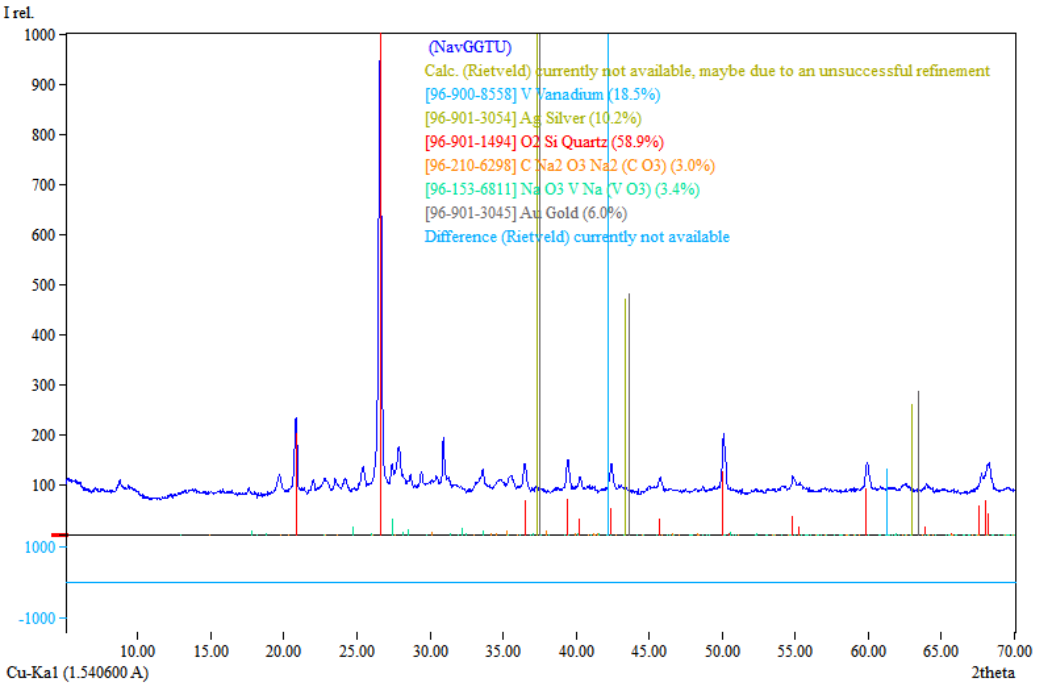


Рисунок 1. Порошковая дифрактограмма огарка после обжига флотационного концентрата хвостов гидрометаллургических заводов

5. Сорбционное цианирование благородных металлов

Кек, образующийся после кислотного выщелачивания ванадия, направляли на сорбционное цианирование с целью извлечения золота и серебра. Процесс основан на образовании устойчивых цианидных комплексов благородных металлов с их последующей сорбцией на ионообменных материалах.

Предварительная термическая и кислотная обработка способствует разрушению и частичному удалению сульфидных, оксидных и силикатных фаз, экранирующих поверхность золотосодержащих частиц. В итоге повышается доступность золота и серебра для цианидного растворения по сравнению с прямым цианированием исходных хвостов без предварительной обработки.

Полученные результаты свидетельствуют о технологической целесообразности включения сорбционного цианирования в завершающую стадию комплексной схемы переработки техногенного сырья. Предварительное обогащение, спекающий обжиг и последовательное выщелачивание редких компонентов создают более благоприятные условия для последующего извлечения благородных металлов.

Сочетание предварительного обогащения с последующим цианированием применяется при переработке сложного серебро- и золотосодержащего минерального сырья [12; 10], что подтверждает обоснованность выбранной последовательности технологических операций.

6. Обоснование комплексной технологической схемы

На основании результатов минералогических и технологических исследований разработана комплексная схема переработки техногенных отходов гидрометаллургических заводов, предусматривающая последовательное применение флотационного и гравитационного обогащения, спекающего обжига, водного и кислотного выщелачивания и сорбционного цианирования.

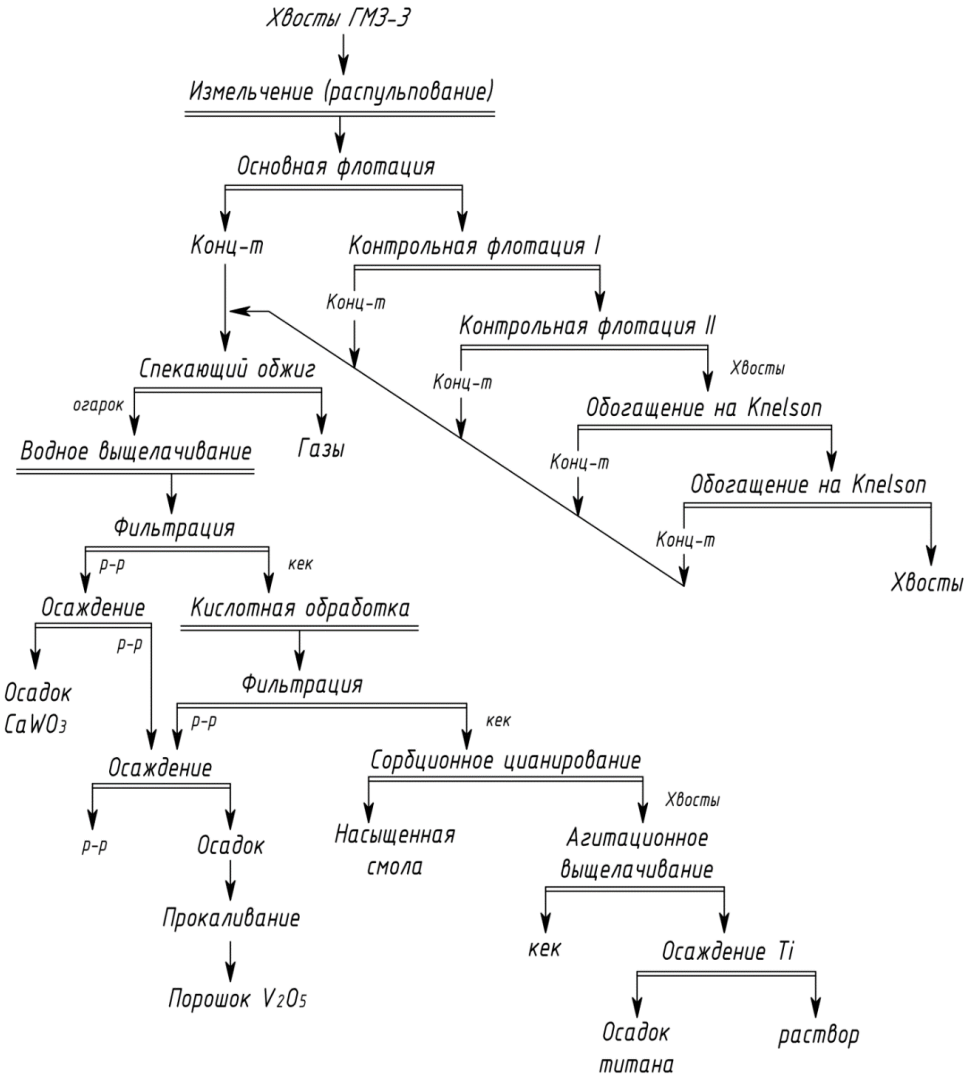


Рисунок 2. Рекомендуемая технологическая схема комплексной переработки хвостов гидрометаллургических заводов

Предлагаемая схема обеспечивает последовательное распределение ценных компонентов между отдельными технологическими переделами. После измельчения исходного материала основная и контрольные стадии флотации обеспечивают получение коллективного концентрата, тогда как часть хвостового продукта дополнительно подвергается гравитационному обогащению на концентраторе Knelson. Полученные концентраты объединяются и направляются на спекающий обжиг.

После обжига водное выщелачивание обеспечивает перевод вольфрама в раствор с последующим его осаждением в форме CaWO4. Твёрдый остаток подвергается кислотной обработке для перевода ванадия в раствор, после чего ванадий осаждается и после

прокаливания получается продукт на основе V_2O_5. Оставшийся кек направляется на сорбционное цианирование для извлечения золота и серебра. Таким образом, разработанная схема обеспечивает комплексное использование техногенного сырья и последовательное извлечение редких и благородных металлов [8; 12; 5; 11; 10].

Заключение

Проведённые исследования показали, что техногенные отходы гидрометаллургических производств содержат остаточные количества благородных и редких металлов и могут рассматриваться как дополнительный источник ценного минерального сырья. Минералого-аналитические исследования подтвердили присутствие золота, серебра, вольфрама, ванадия и ряда сопутствующих компонентов.

Наиболее высокие показатели флотационного извлечения золота составили 46,70 %, серебра — 40,16 %, вольфрама — 30,52 %, ванадия — 27,56 %. Гравитационное обогащение показало меньшую степень общего извлечения, однако обеспечило получение небольшого по массе концентрата с повышенным содержанием вольфрама, что подтверждает целесообразность его использования как вспомогательной стадии предварительного концентрирования.

Спекающий обжиг с карбонатом натрия и последующее водное и кислотное выщелачивание создают условия для перевода вольфрама и ванадия в растворимые формы, а последующее сорбционное цианирование предназначено для извлечения золота и серебра из твёрдого остатка. На основании полученных результатов предложена комплексная технологическая схема, объединяющая обогатительные, термические и гидрометаллургические процессы.

Предложенный подход позволяет повысить степень комплексного использования техногенного сырья, расширить возможности извлечения ценных компонентов из накопленных отходов и снизить потенциальную экологическую нагрузку, связанную с их длительным хранением.

Список литературы

1. Пирматов Э.А., Шодиев А.Н.У., Боймуродов Н.А. Изучение растворимых форм вольфрама и условий кристаллизации шеелита и вольфрамита // Universum: технические науки. – 2023. – № 11. – С. 15–19.
2. Хасанов А.С., Вохидов Б.Р., Мамараимов Г.Ф. Изучение возможности извлечения ванадия из техногенных отходов // ФарПИ Илмий техник журнали. – 2020. – Т. 24, № 3. – С. 97–102.
3. Alam S., Tolibov B., Akhmedov M., Khujamov U., Yarlakabov S. Enhanced extraction of valuable metals from copper slags by disrupting fayalite and spinel structures using sodium sulfate // Minerals. – 2025. – T. 15, № 8. – Art. 771. – DOI: 10.3390/min15080771.
4. Boyko V.A., Kuskov V.L., Kuskova E.V. Heap leaching of silver-bearing ores: Theory and practice // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Mining Journal. – 2020. – № 4. – P. 72–81.

5. Gaur R.P.S., Wolfe T.A., Braymiller S.A. Sodium Carbonate-Roasting-Aqueous-Leaching Method to Process Flot-Grade Scheelite-Sulfide Tungsten Ore Concentrates // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2025. – T. 64, № 16. – P. 8339–8358. – DOI: 10.1021/acs.iecr.4c03754.
6. Mulenshi J., Khavari P., Chehreh Chelgani S., Rosenkranz J. Characterization and beneficiation options for tungsten recovery from Yxsjöberg historical ore tailings // Processes. – 2019. – T. 7, № 12. – Art. 895. – DOI: 10.3390/pr7120895.
7. Surimbayev B., Bolotova L., Akcil A., Yessengarayev Y., Khumarbekuly Y., Kanaly Y., Akzharkenov M. Gravity Concentration of Gold-Bearing Ores and Processing of Concentrates: A Review // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. – 2025. – T. 46, № 7. – P. 726–750. – DOI: 10.1080/08827508.2024.2395824.
8. Vokhidov B.R., Saidakhmedov A.A., Khanna R., Kravchenko M.V., Murodillaeva S.O. Study of technology for extracting precious and rare metals from technogenic waste of NMMC JSC // Mining Information and Analytical Bulletin. – 2025. – № 9. – P. 17–38.
9. Vokhidov B., Hasanov A., Babaev M., Mamaraimov G., Yandashev A. New technologies for processing tailings of a copper processing plant for the extraction of platinoids // Acta Innovations. – 2024. – T. 52. – P. 51–59. – DOI: 10.62441/ActaInnovations.52.6.
10. Vokhidov B.R. Development and improvement of technology for extraction of precious metals from technogenic raw materials // Universum: технические науки. – 2021. – № 12. – P. 11–16.
11. Yan Z., Zheng S., Zhang Y., Zhang Y., Zhou Z., Qiao S. Sodium carbonate roasting and mild acid leaching of vanadium titanomagnetite concentrates: Vanadium extraction and residue sodium decrease // Process Safety and Environmental Protection. – 2024. – T. 185. – P. 1132–1144. – DOI: 10.1016/j.psep.2024.03.046.
12. Zhang J., Zhang Y., Liu Y., Wang S. Combined flotation and cyanidation process for recovering silver from complex silver-bearing ores // Minerals Engineering. – 2022. – T. 178. – Art. 107412.

References

1. Pirmatov E.A., Shodiev A.N.U., Boymurodov N.A. Izuchenie rastvorimykh form volframa i usloviy kristallizatsii sheelita i volframita [Study of soluble forms of tungsten and conditions for crystallization of scheelite and wolframite] // Universum: Technical Sciences. – 2023. – No. 11. – P. 15–19. (In Russ.).
2. Khasanov A.S., Vokhidov B.R., Mamaraimov G.F. Izuchenie vozmozhnosti izvlecheniya vanadiya iz tekhnogennykh otkhodov [Study of the possibility of vanadium extraction from technogenic waste] // FarPI Ilmiy Tekhnik Zhurnali. – 2020. – Vol. 24, No. 3. – P. 97–102. (In Russ.).
3. Alam S., Tolibov B., Akhmedov M., Khujamov U., Yarlakabov S. Enhanced extraction of valuable metals from copper slags by disrupting fayalite and spinel structures using sodium sulfate // Minerals. – 2025. – Vol. 15, No. 8. – Art. 771. – DOI: 10.3390/min15080771.

4. Boyko V.A., Kuskov V.L., Kuskova E.V. Heap leaching of silver-bearing ores: Theory and practice // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Mining Journal. – 2020. – No. 4. – P. 72–81.
5. Gaur R.P.S., Wolfe T.A., Braymiller S.A. Sodium carbonate-roasting-aqueous-leaching method to process flot-grade scheelite-sulfide tungsten ore concentrates // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2025. – Vol. 64, No. 16. – P. 8339–8358. – DOI: 10.1021/acs.iecr.4c03754.
6. Mulenshi J., Khavari P., Chehreh Chelgani S., Rosenkranz J. Characterization and beneficiation options for tungsten recovery from Yxsjöberg historical ore tailings // Processes. – 2019. – Vol. 7, No. 12. – Art. 895. – DOI: 10.3390/pr7120895.
7. Surimbayev B., Bolotova L., Akcil A., Yessengarayev Y., Khumarbekuly Y., Kanaly Y., Akzharkenov M. Gravity concentration of gold-bearing ores and processing of concentrates: A review // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. – 2025. – Vol. 46, No. 7. – P. 726–750. – DOI: 10.1080/08827508.2024.2395824.
8. Vokhidov B.R., Saidakhmedov A.A., Khanna R., Kravchenko M.V., Murodillaeva S.O. Study of technology for extracting precious and rare metals from technogenic waste of NMMC JSC // Mining Information and Analytical Bulletin. – 2025. – No. 9. – P. 17–38.
9. Vokhidov B., Hasanov A., Babaev M., Mamaraimov G., Yandashev A. New technologies for processing tailings of a copper processing plant for the extraction of platinoids // Acta Innovations. – 2024. – Vol. 52. – P. 51–59. – DOI: 10.62441/ActaInnovations.52.6.
10. Vokhidov B.R. Development and improvement of technology for extraction of precious metals from technogenic raw materials // Universum: Technical Sciences. – 2021. – No. 12. – P. 11–16.
11. Yan Z., Zheng S., Zhang Y., Zhang Y., Zhou Z., Qiao S. Sodium carbonate roasting and mild acid leaching of vanadium titanomagnetite concentrates: Vanadium extraction and residue sodium decrease // Process Safety and Environmental Protection. – 2024. – Vol. 185. – P. 1132–1144. – DOI: 10.1016/j.psep.2024.03.046.
12. Zhang J., Zhang Y., Liu Y., Wang S. Combined flotation and cyanidation process for recovering silver from complex silver-bearing ores // Minerals Engineering. – 2022. – Vol. 178. – Art. 107412.

Статья поступила в редакцию: 29.09.2026
Статья принята к публикации: 07.10.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 622.235

Анализ факторов разбуривания взрывных скважин на карьерах

Насиров Уткир Фатидинович
д-р техн. наук, проф.
Алмалыкский филиал Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
Республика Узбекистан, г. Алмалык
E-mail: shaxzodxayrulloyev@gmail.com

Суйунов Аброр Салохиддинович
инженер
производственно-технического отдела (ПТО) рудника М, АО Навоийский горно-металлургический комбинат
Республика Узбекистан, г. Зарафшан

Хайруллоев Шахзод Шукрилло угли
Базовый докторант
Алмалыкский филиал Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
Республика Узбекистан, г. Алмалык

Analysis of blasthole enlargement factors in open pit mines

Nasirov Utkir Fatidinovich
doctor of Technical Sciences, Professor
Almalyk Branch of NUST MISIS
Uzbekistan, Almalyk

Suyunov Abror Salokhiddinovich
Engineer, Production and Technical Department (PTD), Mine M, Navoi Mining and Metallurgical Company JSC (NMMC)
Uzbekistan, Zarafshan

Khairulloev Shakhzod Shukrillo ugli
PhD candidate
Almalyk Branch of NUST MISIS
Uzbekistan, Almalyk

Аннотация

Цель исследования – систематизировать факторы разбуривания взрывных скважин на карьерах и по натурным данным оценить отклонение фактического диаметра скважины от паспортного и его влияние на вместимость скважины. Методология включает анализ

Библиографическое описание: Насиров У.Ф., Суйунов А.С., Хайруллоев Ш.Ш.У. Анализ факторов разбуривания взрывных скважин на карьерах // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23510

литературных источников, классификацию факторов по природе их воздействия, измерение профиля диаметра одной взрывной скважины кавернометром в слюдисто-кварцевых сланцах с коэффициентом крепости f = 10 и статистическую обработку с проверкой автокорреляции последовательных замеров. Выделены четыре группы факторов разбуривания: горно-геологические, технологические, технические и организационные; их индивидуальное влияние в работе экспериментально не устанавливалось. Все 54 замера в интервале глубин 1,0–15,63 м превысили паспортный диаметр 250 мм. Профиль исследованной скважины разделяется на две зоны: в приустьевой зоне 1,0–7,0 м средний диаметр составил 294,5 мм, в интервале 7,76–15,63 м – 262,5 ± 2,3 мм с учётом автокорреляции замеров. Все значения приустьевой зоны превышают максимум нижней зоны. Средневзвешенная вместимость скважины, рассчитанная интегрированием квадрата диаметра методом трапеций, выше паспортной на 42,3 % в приустьевой зоне и на 9,9 % в нижней. Выводы относятся к исследованной скважине; для обобщения необходимы массовые измерения. Практическая значимость работы состоит в обосновании программы натурных исследований фактического диаметра взрывных скважин и перечня регистрируемых факторов.

Abstract

The aim of the study is to systematize the factors of blasthole enlargement in open pits and to use field data to evaluate the deviation of the actual hole diameter from the design value and its effect on hole capacity. The methodology includes literature analysis, classification of factors by the nature of their influence, caliper measurement of the diameter profile of one blasthole in quartz-mica schist with a Protodyakonov hardness coefficient f = 10, and statistical processing with a check for autocorrelation of successive measurements. Four groups of enlargement factors are identified: geological, technological, technical and organizational; their individual influence was not established experimentally in this work. All 54 measurements at depths of 1.0–15.63 m exceeded the design diameter of 250 mm. The profile of the studied hole divides into two zones: in the collar zone of 1.0–7.0 m the mean diameter was 294.5 mm, and at 7.76–15.63 m it was 262.5 ± 2.3 mm taking autocorrelation into account. All collar-zone values exceed the maximum of the lower zone. The length-weighted hole capacity, calculated by trapezoidal integration of the squared diameter, exceeds the design value by 42.3 % in the collar zone and by 9.9 % in the lower zone. The conclusions refer to the studied hole; mass measurements are needed for generalization. The practical significance lies in substantiating a program of field studies of the actual blasthole diameter and the list of factors to be recorded.

Ключевые слова: взрывная скважина, коэффициент разбуривания, фактический диаметр, кавернометрия, вместимость скважины, автокорреляция, приустьевая зона.

Keywords: blasthole, hole enlargement coefficient, actual diameter, caliper logging, hole capacity, autocorrelation, collar zone.

Введение

Буровзрывные работы остаются основным способом подготовки скальных пород к выемке на крупных карьерах; от качества дробления зависят производительность выемочно-транспортного оборудования и затраты на последующее дробление [3, 4]. Базовым

параметром паспорта буровзрывных работ является диаметр скважинного заряда: от него зависят вместимость скважины, сетка и длина забойки [4, 7, 10]. В нормативных и методических источниках он принимается равным диаметру долота или номинальному диаметру скважины [5–7]. Фактический диаметр отличается от него: он увеличивается при разрушении стенок и уменьшается при износе долота [9]. Эмульсионные взрывчатые вещества (ВВ) заполняют фактический объём скважины, а их взаимодействие со стенкой определяет передачу энергии массиву [11], поэтому отклонение диаметра непосредственно изменяет массу заряда.

Современные исследования развивают контроль геометрии и состояния взрывных скважин: регистрацию параметров бурения для оценки свойств массива [12, 15], видеосъёмку стенок скважин [15], автоматическое определение положения скважин по данным беспилотной съёмки [16], анализ слоя шлама на стенках, ограничивающего оптические методы [13]. Однако количественных данных о распределении фактического диаметра по глубине взрывных скважин шарошечного бурения в доступной литературе недостаточно.

Цель исследования – систематизировать факторы разбуривания взрывных скважин и по натурным данным оценить отклонение фактического диаметра от паспортного и его влияние на вместимость скважины.

Материалы и методы

Объект измерений. Измерения выполнены на карьере сложноструктурного месторождения эндогенного происхождения; наименование объекта не приводится по условиям предоставления данных предприятием-недропользователем. Скважина № 1321, блок 187, дата обследования 12.08.2026г. Высота уступа 15 м, угол наклона скважины 0°. Бурение выполнено станком СБШ-250МНА-32 (паспортные пределы: осевое усилие до 300 кН, частота вращения бурового става 0,2–2,5 $с^{-1}$ [8]) шарошечным долотом диаметром 244,5 мм; паспортный диаметр скважины 250 мм. Фактические режимы бурения и наработка долота при обследовании не регистрировались. Породы – слюдисто-кварцевые сланцы с коэффициентом крепости по шкале проф. М.М. Протодьяконова f = 10 и коэффициентом разрыхления 1,47; категория трещиноватости при обследовании не определялась; скважина сухая, обводнённость отсутствовала.

Измерения. Профиль диаметра определён кавернометром [2]. Получено 54 пары «глубина – диаметр» (табл. 1): 6 замеров в интервале 1,0–7,0 м с шагом около 1 м и 48 замеров в интервале 7,76–15,63 м с медианным шагом 0,12 м. Интервалы 0–1,0 м, около 3 м и 7,0–7,76 м не измерялись.

Таблица 1. Результаты кавернометрии: глубина z и фактический диаметр d

z, м	d, мм	z, м	d, мм	z, м	d, мм
1,00	296,0	11,48	263,0	13,69	259,3
2,00	300,0	11,60	264,1	13,82	258,1
4,00	320,0	11,72	268,4	13,90	257,2
5,00	280,0	11,85	267,8	13,94	261,3
6,00	288,0	11,97	265,0	14,06	260,1
7,00	283,0	12,09	262,0	14,18	264,8

z, м	d, мм	z, м	d, мм	z, м	d, мм
7,76	265,2	12,21	262,1	14,30	267,8
8,80	258,8	12,33	268,1	14,42	269,8
9,20	261,5	12,46	259,4	14,55	276,8
9,76	258,8	12,58	260,4	14,67	265,7
9,88	259,7	12,70	259,9	14,79	268,9
10,00	259,0	12,82	263,6	14,91	259,8
10,74	258,4	12,95	261,6	15,03	266,8
10,86	257,8	13,07	263,2	15,15	257,3
10,99	261,6	13,20	263,6	15,27	256,0
11,11	262,1	13,32	266,0	15,39	258,0
11,23	268,5	13,45	264,4	15,52	257,9
11,36	263,5	13,57	259,8	15,63	257,8

Статистическая обработка. Замеры выполнены в одной скважине, поэтому последовательные значения могут быть пространственно зависимыми. Для нижней зоны с равномерным шагом рассчитывался коэффициент автокорреляции первого порядка r_1, значимость автокорреляции проверялась критерием Льюнга – Бокса [14], а эффективный объём выборки оценивался как:

$$n_{эф} = n \cdot \frac{1 - r_1}{1 + r_1}. \quad (1)$$

Доверительный интервал среднего рассчитывался по распределению Стьюдента с объёмом $n_{эф}$. Различие зон проверялось критерием Манна – Уитни; для учёта зависимости замеров критерий повторялся на прореженной выборке нижней зоны (каждый третий замер), у которой автокорреляция незначима. Связь диаметра с глубиной в нижней зоне оценивалась коэффициентом корреляции Спирмена. Вместимость скважины в точке замера $P(z_i) = \pi \cdot d_i^2 \cdot \frac{\Delta}{4}$ рассчитывалась при плотности эмульсионного ВВ Δ = 1200 кг/м^3; паспортная вместимость при диаметре 250 мм составляет 58,9 кг/м. Средневзвешенная вместимость зоны определялась интегрированием методом трапеций величины, пропорциональной квадрату диаметра, по измеренным точкам с учётом неравномерного шага:

$$P_{ср} = \left(\frac{1}{L}\right) \cdot \Sigma \left(P_i + P_i + 1\right) \cdot \frac{(z_i + 1 - z_i)}{2}, \quad (2)$$

где L – длина интервала интегрирования. Приустьевая зона интегрировалась в пределах 1,0–7,0 м, нижняя – в пределах 7,76–15,63 м; неизмеренный интервал 7,0–7,76 м в расчёт не включался и не интерполировался. Для контроля выполнен альтернативный расчёт с предварительной линейной интерполяцией диаметра и последующим возведением в квадрат.

Результаты и обсуждение

Факторы разбуривания. На основе анализа источников [1, 4, 9, 12, 15] выделены четыре группы факторов. Горно-геологические: в крепких абразивных породах преобладает износ долота по калибру и диаметр уменьшается [9], в трещиноватых и разнопрочных породах стенки выкрашиваются и диаметр растёт [1]. Технологические: осевое усилие, частота вращения и продувка определяют колебания става и эрозию стенок. Технические: износ долота, изгиб става, зазор между ставом и стенкой. Организационные: регламент замены долот, время до заряжания, контроль геометрии скважин. Классификация основана на литературных данных; индивидуальное влияние факторов в настоящей работе экспериментально не устанавливалось.

Профиль диаметра. Профиль приведён на рис. 1, характеристики зон – в табл. 2. Пунктирная линия на рис. 1 соединяет крайние замеры через неизмеренный интервал 7,0–7,76 м исключительно для наглядности и не отражает данных.

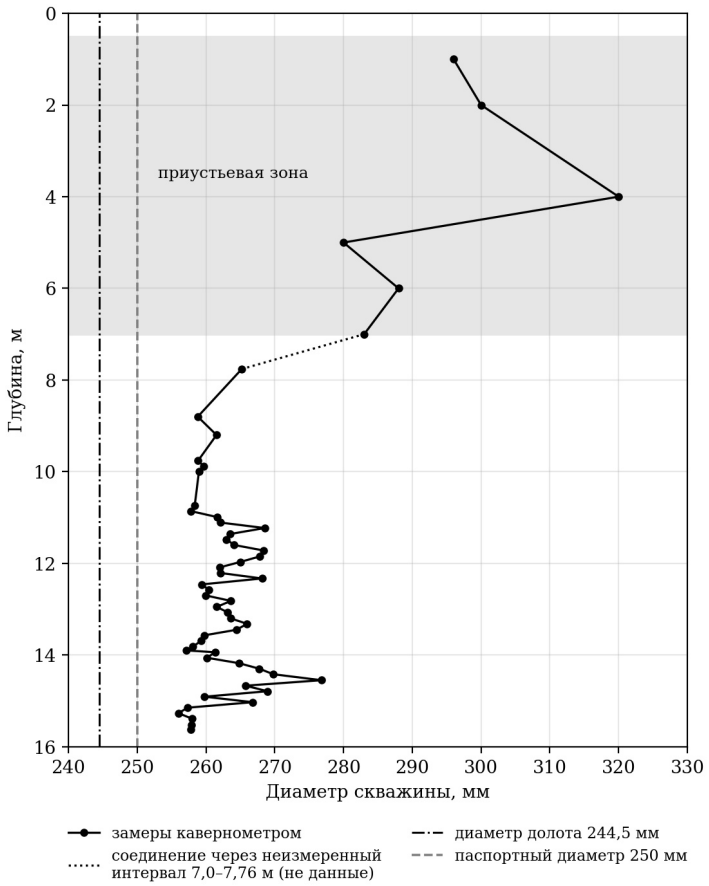


Рисунок 1. Профиль фактического диаметра исследованной скважины

Таблица 2. Характеристики фактического диаметра по зонам скважины

Показатель	Приустьевая зона 1,0–7,0 м	Нижняя зона 7,76–15,63 м
Число замеров n	6	48
Среднее, мм	294,5	262,5
Медиана, мм	292,0	261,8
Стандартное отклонение, мм	14,61	4,26

Показатель	Приустьевая зона 1,0–7,0 м	Нижняя зона 7,76–15,63 м
Минимум / максимум, мм	280,0 / 320,0	256,0 / 276,8
Автокорреляция r_1	—	0,52
Эффективный объём $n_{эф}$	6	15
95%-й доверительный интервал среднего, мм	279,2–309,8	260,2–264,8
Коэффициент разбуривания $d_{ср}/244,5$	1,204	1,074
Средневзвешенная вместимость $P_{ср}$, кг/м	83,8	64,7
Отклонение от паспортной вместимости, %	+42,3	+9,9

Все 54 замера превысили паспортный диаметр 250 мм. В нижней зоне последовательные замеры зависимы: $r_1 = 0,52$, критерий Льюнга – Бокса $Q = 24,3$ при $p < 0,001$. Эффективный объём выборки составляет около 15 вместо 48, поэтому доверительный интервал среднего расширяется с ±1,2 до ±2,3 мм. Различие зон устойчиво к учёту зависимости: критерий Манна – Уитни даёт $p < 0,001$ как на полной, так и на прореженной выборке ($n = 16$, $r_1 = 0,02$, $p < 0,001$); кроме того, все шесть значений приустьевой зоны (280–320 мм) превышают максимум нижней зоны (276,8 мм). Монотонной связи диаметра с глубиной в нижней зоне не выявлено (коэффициент Спирмена −0,05, $p = 0,72$). Полученные значения p характеризуют профиль исследованной скважины и не могут быть перенесены на совокупность скважин карьера. Средневзвешенная вместимость составила 83,8 кг/м в приустьевой зоне и 64,7 кг/м в нижней; расчёт с предварительной интерполяцией диаметра даёт 83,8 и 64,7 кг/м соответственно (расхождение менее 0,1 %), что подтверждает устойчивость результата к способу интегрирования. При заряжании до паспортной высоты колонки каждый метр заряда в нижней зоне содержит на 5,8 кг ВВ больше расчётного; при заряжании паспортной массой колонка укорачивается, а забойка удлиняется. Принцип согласования длины забойки с линией сопротивления, исследованный в работе [17] для подземных длинноскважинных взрывов, носит общий характер и использован здесь только качественно; количественные результаты [17] к карьерным условиям не переносятся. Повышенный диаметр приустьевой зоны согласуется с предположением о её разбуривании в пределах нарушенной зоны от перебура вышележащего уступа, однако для проверки этой причины необходимы данные о трещиноватости и границах нарушенной зоны по глубине; влияние обводнённости в исследованной сухой скважине исключено. Для обобщения результатов требуются измерения в нескольких скважинах разных литологических разностей со сплошной записью приустьевого интервала.

Заключение

1. Выделены четыре группы факторов разбуривания взрывных скважин: горно-геологические, технологические, технические и организационные; классификация основана на литературных данных.

2. В исследованной скважине (слюдисто-кварцевые сланцы, $f = 10$) все 54 замера превысили паспортный диаметр 250 мм; средний диаметр составил 294,5 мм в приустьевой зоне 1,0–7,0 м и 262,5 ± 2,3 мм в интервале 7,76–15,63 м с учётом автокорреляции замеров.

3. Средневзвешенная вместимость исследованной скважины выше паспортной на 42,3 % в приустьевой зоне и на 9,9 % в нижней; результат устойчив к способу интегрирования.

4. Выводы относятся к исследованной скважине. Для установления причин разбуривания и обобщения результатов необходимы массовые измерения с регистрацией трещиноватости, наработки долота и фактических режимов бурения.

Список литературы

1. Ивановский Д.С., Насиров У.Ф., Заиров Ш.Ш., Уринов Ш.Р. Перемещение разнопрочных горных пород энергией взрыва: монография. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2020. – 116 с.
2. Итенберг С.С. Интерпретация результатов геофизических исследований скважин. – М.: Недра, 1987. – 374 с.
3. Ишейский В.А., Рядинский Д.Э., Магомедов Г.С. Повышение качества дробления горных пород взрывом за счет учета структурных особенностей взрываемого массива // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 9–1. – С. 79–95. – DOI: 10.25018/0236_1493_2023_91_0_79.
4. Кутузов Б.Н. Методы ведения взрывных работ. В 2 ч. – М.: Горная книга, 2007. – 471 с.
5. Норов Ю.Д., Раимжанов Б.Р. Лабораторные и практические работы по курсу «Буровзрывные работы». – Навои. – 2004. – 240 с.
6. Отраслевые нормативы буровзрывных работ для карьеров горнодобывающих предприятий цветной металлургии: утв. приказом Минцветмета СССР от 11.04.1977 № 162.
7. Ржевский В.В. Открытые горные работы. Ч. 1. – М.: Недра, 1985. – 509 с.
8. Станок буровой шарошечный СБШ-250МНА-32: технические характеристики (ТУ 3145-100-00211044-93) [Электронный ресурс]. URL: https://rgmural.ru/katalog/burovye-stanki-sbsh/sbsh-250mna-32 (дата обращения: 20.10.2026).
9. Тангаев И.А. Буримость и взрываемость горных пород. – М.: Недра, 1978. – 183 с.
10. Adhikari G.R. Selection of blasthole diameter for a given bench height at surface mines // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 1999. – Т. 36. – P. 843–847.
11. Afanasev P.I., Makhmudov K.F. Assessment of the parameters of a shock wave on the wall of an explosion cavity with the refraction of a detonation wave of emulsion explosives // Applied Sciences. – 2021. – Т. 11, № 9. – Art. 3976. – DOI: 10.3390/app11093976.
12. Babaei Khorzoughi M., Hall R., Apel D. Rock fracture density characterization using measurement while drilling (MWD) techniques // International Journal of Mining Science and Technology. – 2018. – DOI: 10.1016/j.ijmst.2018.01.001.
13. Brand J., Maximova K., Madden S. [et al.] Femtosecond laser processing for blast-hole analysis: laser removal of slurry and effect on rocks // Optics and Laser Technology. – 2025. – Т. 189. – Art. 113166.

14. Ljung G.M., Box G.E.P. On a measure of lack of fit in time series models // Biometrika. – 1978. – T. 65, № 2. – P. 297–303.
15. Navarro J., Seidl T., Hartlieb P. [et al.] Blastability and ore grade assessment from drill monitoring for open pit applications // Rock Mechanics and Rock Engineering. – 2021. – DOI: 10.1007/s00603-020-02354-2.
16. Valencia J., Emami E., Battulwar R. [et al.] Blasthole location detection using support vector machine and convolutional neural networks on UAV images and photogrammetry models // Electronics. – 2024. – T. 13, № 7. – Art. 1291. – DOI: 10.3390/electronics13071291.
17. Zhang Z., Qiu X., Shi X. [et al.] Optimization of the matching relationship between the stemming length and minimum burden in cut blasting of large-diameter long-hole stopes // Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources. – 2023. – T. 9, № 1. – P. 1–22. – DOI: 10.1007/s40948-023-00674-5.

References

1. Ivanovskiy D.S., Nasirov U.F., Zairov Sh.Sh., Urinov Sh.R. Peremeshcheniye raznoprochnykh gornykh porod energiyey vzryva [Displacement of rocks of different strength by blast energy]. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2020. 116 P. (In Russ.).
2. Itenberg S.S. Interpretatsiya rezul'tatov geofizicheskikh issledovaniy skvazhin [Interpretation of well logging results]. Moscow: Nedra, 1987. (In Russ.).
3. Isheyskiy V.A., Ryadinskiy D.E., Magomedov G.S. Povysheniye kachestva drobleniya gornykh porod vzryvom za schet ucheta strukturnykh osobennostey vzryvayemogo massiva [Increasing the quality of rock fragmentation by blasting based on accounting for structural features of the blasted massif]. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten', 2023, no. 9–1, P. 79–95. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_91_0_79. (In Russ.).
4. Kutuzov B.N. Metody vedeniya vzryvnykh rabot. V 2 ch. [Methods of blasting operations. In 2 parts]. Moscow: Gornaya kniga, 2007. (In Russ.).
5. Norov Yu.D., Raimzhanov B.R. Laboratornyye i prakticheskiye raboty po kursu «Burovzryvnyye raboty» [Laboratory and practical works on the course «Drilling and blasting»]. Navoi, 2004. 240 P. (In Russ.).
6. Otraslevyye normativy burovzryvnykh rabot dlya kar'yerov gornodobyvayushchikh predpriyatiy tsvetnoy metallurgii [Industry standards for drilling and blasting in open pits of non-ferrous metallurgy mining enterprises]. Approved by Order of the USSR Ministry of Non-Ferrous Metallurgy No. 162 of 11.04.1977. (In Russ.).
7. Rzhevskiy V.V. Otkrytyye gornyye raboty. Ch. 1 [Open-pit mining. Part 1]. Moscow: Nedra, 1985. (In Russ.).
8. Stanok burovoy sharoshechnyy SBSh-250MNA-32: tekhnicheskiye kharakteristiki [Rotary blasthole drill rig SBSh-250MNA-32: technical specifications] (TU 3145-100-00211044-93). [Электронный ресурс]. – URL: https://rgmural.ru/katalog/burovye-stanki-sbsh/sbsh-250mna-32 (accessed: 20.10.2026). (In Russ.).

9. Tangayev I.A. Burimost' i vzryvayemost' gornykh porod [Drillability and blastability of rocks]. Moscow: Nedra, 1978. (In Russ.).
10. Adhikari G.R. Selection of blasthole diameter for a given bench height at surface mines. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, vol. 36, P. 843–847.
11. Afanasev P.I., Makhmudov K.F. Assessment of the parameters of a shock wave on the wall of an explosion cavity with the refraction of a detonation wave of emulsion explosives. Applied Sciences, 2021, vol. 11, no. 9, art. 3976. DOI: 10.3390/app11093976.
12. Babaei Khorzoughi M., Hall R., Apel D. Rock fracture density characterization using measurement while drilling (MWD) techniques. International Journal of Mining Science and Technology, 2018. DOI: 10.1016/j.ijmst.2018.01.001.
13. Brand J., Maximova K., Madden S. et al. Femtosecond laser processing for blast-hole analysis: laser removal of slurry and effect on rocks. Optics and Laser Technology, 2025, vol. 189, art. 113166.
14. Ljung G.M., Box G.E.P. On a measure of lack of fit in time series models. Biometrika, 1978, vol. 65, no. 2, P. 297–303.
15. Navarro J., Seidl T., Hartlieb P. et al. Blastability and ore grade assessment from drill monitoring for open pit applications. Rock Mechanics and Rock Engineering. – 2021. – DOI: 10.1007/s00603-020-02354-2.
16. Valencia J., Emami E., Battulwar R. et al. Blasthole location detection using support vector machine and convolutional neural networks on UAV images and photogrammetry models. Electronics, 2024, vol. 13, no. 7, art. 1291. DOI: 10.3390/electronics13071291.
17. Zhang Z., Qiu X., Shi X. et al. Optimization of the matching relationship between the stemming length and minimum burden in cut blasting of large-diameter long-hole stopes. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 2023, vol. 9, no. 1, P. 1–22. DOI: 10.1007/s40948-023-00674-5.

Статья поступила в редакцию: 08.09.2026
Статья принята к публикации: 12.10.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 622.8+532.5

Определение напорной характеристики вентиляционно-эжекторной системы на основе аналитического и численного моделирования

Нурхонов Хусан Алмирза угли
доц. кафедры
Геология и горное дело, Каршинский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Карши
E-mail: nurxonovxusan@gmail.com

Равшанов Аваз Али угли
учебно-курсовой комбинат, мастер производственного обучения, АО НГМК, Южное рудоуправление
Республика Узбекистан, г. Навои

Determination of pressure characteristics of a ventilation-ejector system based on analytical and numerical modeling

Nurkhonov Khusan Almirza ugli
Associate Professor
Department of Geology and Mining, Karshi State Technical University
Republic of Uzbekistan, Karshi

Ravshanov Avaz Ali ugli
master of Industrial Training, JSC NGMK, Southern Ore Management, Training and Coursework Combine
Republic of Uzbekistan, Navoi

Аннотация

В статье исследована напорная характеристика вентиляционно-эжекторной системы для горных выработок большого поперечного сечения. Рассмотрены ограничения существующих одномерных аналитических моделей эжекторов и обоснована необходимость применения трёхмерного численного моделирования воздушных потоков. Расчёты выполнены в программном комплексе ANSYS Fluent 17.1 на геометрической модели транспортного штрека длиной 200 м и площадью поперечного сечения 121 м² с вентилятором, соплом и камерой смешения. Проанализированы поля скорости и статического давления, расширение эжекторной струи, формирование циркуляционных зон и влияние расположения установки на аэродинамические параметры выработки. Установлено, что зона существенного воздействия эжекторного потока достигает примерно 150 м. Размещение камеры смешения на расстоянии 0–1 м от выходного сечения вентилятора обеспечивает эффективное

Библиографическое описание: Нурхонов Х.А.У., Равшанов А.А.У. Определение напорной характеристики вентиляционно-эжекторной системы на основе аналитического и численного моделирования // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23551

использование кинетической энергии первичного потока. Отсутствие камеры снижает создаваемый напор примерно на 10 %. Наиболее эффективным является размещение эжекторной установки в центральной части поперечного сечения выработки, что позволяет повысить аэродинамический напор до 35 %, тогда как размещение у почвы обеспечивает увеличение до 20 %. Разработана процедура осреднения трёхмерных полей скорости и давления по поперечному сечению выработки, позволяющая получить эквивалентную напорную характеристику эжекторной установки в виде зависимости ΔP = f(Q) для использования в одномерных расчётах шахтных вентиляционных сетей. Полученные результаты могут использоваться для определения эквивалентной напорной характеристики эжекторной установки в расчётах шахтных вентиляционных сетей.

Abstract

The article investigates the pressure characteristic of a ventilation-ejector system for large-section underground mine workings. Limitations of existing one-dimensional analytical ejector models are considered, and the need for three-dimensional numerical airflow simulation is substantiated. Calculations were performed in ANSYS Fluent 17.1 using a 200 m transport drift with a cross-sectional area of 121 m², equipped with a fan, nozzle, and mixing chamber. Velocity and static-pressure fields, ejector-jet expansion, circulation zones, and unit-location effects on aerodynamic performance were analyzed. The significant influence zone of the ejector flow reaches approximately 150 m. Positioning the mixing chamber 0–1 m from the fan outlet effectively uses primary-airflow kinetic energy. Removing the mixing chamber reduces generated pressure by about 10 %. The most efficient arrangement is in the central part of the drift cross-section, increasing aerodynamic pressure by up to 35 %, while floor-level placement provides an increase of up to 20 %. A procedure for averaging three-dimensional velocity and pressure fields over the working cross-section has been developed, making it possible to obtain the equivalent pressure characteristic of the ejector unit as ΔP = f(Q) for use in one-dimensional mine ventilation network calculations. The results support determination of the equivalent pressure characteristic of ejector units in mine ventilation network calculations.

Ключевые слова: вентиляция шахт, рудничная вентиляция, вентиляционно-эжекторная система, эжекторная установка, вентилятор, камера смешения, воздушный поток, эжекционный поток, аэродинамический напор, напорная характеристика, аэродинамическое сопротивление, скорость воздушного потока, распределение давления, численное моделирование, трёхмерная модель, ANSYS Fluent, транспортный штрек, горная выработка.

Keywords: mine ventilation, underground mine ventilation, ventilation-ejector system, ejector unit, ventilation fan, mixing chamber, airflow, ejector airflow, aerodynamic pressure, pressure characteristic, aerodynamic resistance, airflow velocity, pressure distribution, numerical simulation, three-dimensional model, ANSYS Fluent, transport drift, underground mine working.

Введение

Теоретические основы рудничной вентиляции и процессов эжекции в подземных горных выработках заложены в фундаментальных работах И.И. Медведева, посвящённых аэрогазодинамике шахт и рудников [10]. Значительный вклад в развитие методов расчёта

вентиляторных эжекторных установок внесли Д.Н. Алыменко, Б.П. Казаков, А.В. Шалимов и Н.Н. Мохирев [1, 4, 9, 15]. Так, в работе Д.Н. Алыменко рассмотрены вопросы аэродинамики эжекторных установок и их работы в шахтных вентиляционных сетях, включая режимы работы в противонапоре с главной вентиляторной установкой [1]. Н.Н. Мохирев разработал аналитические зависимости для определения режимов работы вентиляторов-эжекторов, в том числе при параллельной работе нескольких установок в одном поперечном сечении выработки [15]. Б.П. Казаков и А.В. Шалимов уделили особое внимание математическому моделированию взаимодействия воздушных потоков при эжекции [9].

Вместе с тем анализ современных публикаций показывает, что существующие одномерные аналитические модели эжекции имеют ограниченную применимость в условиях горных выработок большого поперечного сечения. Как отмечается в работе А.А. Равшанова, Х.А. Нурхонова и соавторов, при малом аэродинамическом сопротивлении выработки точность аналитических моделей, основанных на законах сохранения энергии и импульса, существенно снижается [12, 21]. Это связано с тем, что в выработках большого сечения пространственная неравномерность поля скоростей и особенности расширения эжекторной струи не могут быть достаточно точно описаны одномерными моделями, предполагающими завершённость процесса смешения потоков.

В связи с этим всё большее распространение получают методы численного моделирования на основе трёхмерной расчётной области. В работах С.С. Кобылкина обоснована необходимость применения объёмного моделирования аэрогазодинамических процессов для расчёта параметров вентиляции шахт и показаны преимущества данного подхода перед традиционными одномерными схемами [5, 6, 16]. Н.О. Каледина и С.С. Кобылкин применили численное моделирование для решения задач обеспечения метанобезопасности горных работ [11]. В работах Д.Н. Алыменко и А.А. Иванова рассмотрены вопросы моделирования вентиляторных эжекторных установок и метода расчёта числа Рейнольдса потоков воздуха при эжекционном процессе [2]. Вместе с тем, несмотря на растущее число исследований в области численного моделирования рудничной вентиляции, вопросы определения эквивалентной напорной характеристики вентиляционно-эжекторных систем для последующего использования в одномерных расчётах шахтных вентиляционных сетей остаются недостаточно изученными.

Таким образом, анализ литературных источников показывает, что существующие аналитические модели эжекции имеют ограничения применительно к выработкам большого поперечного сечения, а методы численного моделирования не в полной мере адаптированы для получения эквивалентных напорных характеристик эжекторных установок. Это обусловливает необходимость проведения комплексного исследования, сочетающего аналитический и численный подходы.

Проветривание центральной части рудника «Зармитан» осуществляется нагнетательным способом по фланговой схеме. Проветривание очистных и подготовительных горных выработок обеспечивается главной вентиляторной установкой (ГВУ) и вентиляторами местного проветривания (ВМП). Свежий воздух вентиляторной установкой ВОД-30, размещённой у устья ствола «Главная», подаётся по стволу на горизонт 900 м и направляется на проветривание склада взрывчатых материалов и штольни

«Капитальная». Кроме того, свежий воздух поступает на горизонты 780, 720, 660, 600 и 540 м для проветривания очистных и подготовительных работ. На горизонт 840 м свежий воздух подаётся только для поддержания горных выработок. Необходимый расход свежего воздуха для проветривания штольни НТС горизонта 480 м поступает из квершлага «Северный» горизонта 600 м с помощью вентилятора местного проветривания. Отработанный воздух после проветривания рабочих зон направляется по вентиляционным восстающим (ВВ) и вентиляционно-ходовым восстающим (ВХВ) в выработки вышележащих горизонтов. Далее он удаляется в атмосферу через ствол «Вспомогательный», НТС 1–3 и отдельные погашенные выработки, имеющие аэродинамическую связь с земной поверхностью. В настоящее время главная вентиляторная установка ВОД-21М у устья ствола №3, предназначенная для проветривания НТС 1–3, исключена из схемы проветривания согласно плану ликвидации аварий. Поэтому проветривание НТС 1–3 осуществляется за счёт воздушных потоков, поступающих с горизонтов 540, 600, 660, 720 и 780 м.

Целью настоящей работы является определение эквивалентной напорной характеристики вентиляционно-эжекторной системы на основе аналитического и численного моделирования для условий транспортного штрека большого поперечного сечения. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи: анализ ограничений существующих аналитических моделей эжекции; разработка трёхмерной геометрической модели транспортного штрека с вентиляционно-эжекторной установкой; численное исследование полей скорости и статического давления в ANSYS Fluent; оценка влияния расположения эжекторной установки на аэродинамические параметры выработки; разработка процедуры осреднения трёхмерных полей для получения эквивалентной напорной характеристики.

Материалы и методы

В горных выработках большого поперечного сечения, где требуется применение эжекторных установок, распределение скорости воздуха по площади сечения характеризуется значительной неравномерностью. Такая пространственная неоднородность осложняет теоретическое описание аэродинамических процессов вентиляционной сети. В этих условиях возможности классического подхода, основанного на расчёте воздухораспределения с помощью системы одномерных аэродинамических уравнений, сформулированных на основе законов Кирхгофа, ограничены [20]. Существующие аналитические модели, разработанные для расчёта явления эжекции [13], в рассматриваемых условиях имеют определённые ограничения. В частности, при использовании подходов, основанных на законе сохранения энергии [18], точность расчётов существенно снижается при малом аэродинамическом сопротивлении горной выработки. Кроме того, применение этих подходов в практических аэродинамических расчётах требует предварительного задания ряда параметров, определяемых экспериментально. Аналитические подходы, основанные на законе сохранения импульса [17], позволяют описывать формирование эжекторного потока лишь при определённых аэродинамических условиях. В частности, предполагается, что воздушная струя на выходе из эжектора достаточно расширилась по поперечному сечению выработки и процесс её формирования завершён. При разработке математических моделей эжекторных установок Б.П. Казаков и А.В. Шалимов уделяли особое внимание

взаимодействию воздушных потоков и аналитическому описанию процесса эжекции [9]. Однако в выработках большого поперечного сечения пространственная неравномерность скорости и особенности расширения эжекторной струи не во всех случаях могут быть достаточно точно описаны одномерными аналитическими моделями. Поэтому для оценки воздухораспределения в таких условиях целесообразно использовать методы численного моделирования на основе трёхмерной расчётной области. Вопросы численного моделирования сложных аэрогазодинамических процессов рудничной вентиляции также рассмотрены в исследованиях С.С. Кобылкина [5].

На рисунке 1 представлена расчётно-геометрическая модель транспортного штрека большого поперечного сечения, оборудованного вентиляционно-эжекторной установкой. Во входном сечении расчётной области в качестве граничных условий задаются массовый расход воздуха Qвх и статическое давление Рвх. В центральной части штрека размещены вентилятор, сопло и камера смешения. В данной зоне происходит взаимодействие первичного воздушного потока, создаваемого вентилятором, с вторичным потоком, вовлекаемым в движение за счёт эффекта эжекции, с последующим их смешением. Сформировавшийся объединённый воздушный поток далее перемещается по транспортному штреку в направлении выходного сечения расчётной области. На выходной границе задаётся условие по статическому давлению Рвых. Основными геометрическими параметрами модели являются длина штрека L, ширина B и высота H, определяющие размеры расчётной области. Разработанная геометрическая модель служит основой для численного исследования пространственного формирования воздушного потока, анализа распределения скоростей и статического давления, а также определения эквивалентной напорной характеристики вентиляционно-эжекторной системы.

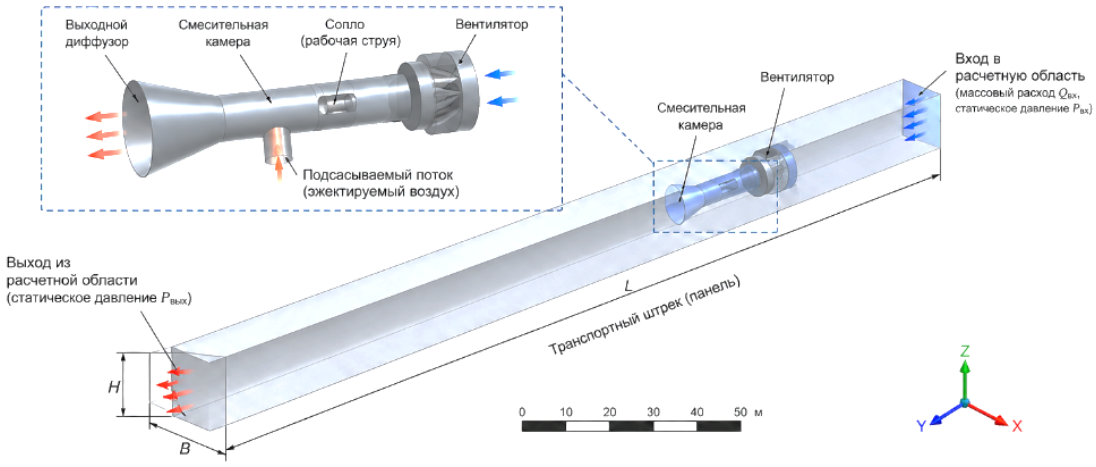


Рисунок 1. Геометрическая модель транспортного штрека с установленной эжекторной установкой и камерой смешения

Численные исследования воздушного потока выполнены в программном комплексе ANSYS Fluent 17.1. Для задания напорной характеристики вентилятора использовалась заводская аэродинамическая характеристика, аппроксимированная полиномом второй степени:

$$\Delta P = 2489 + 132,5V - 7,19V^2, \quad (1)$$

где ΔP — создаваемый вентилятором перепад статического давления, Па; V — скорость воздушного потока на выходе из вентилятора, м/с. Коэффициенты полинома имеют размерности: 2489 Па; 132,5 Па·с/м; 7,19 Па·с²/м². Формула справедлива в диапазоне скоростей V = 0…18 м/с, соответствующем паспортной рабочей зоне вентилятора. Выбор полиномиальной аппроксимации вместо стандартной формы $\Delta P = a - bQ^2$ обусловлен тем, что заводская характеристика вентилятора в исследуемом диапазоне расходов имеет ярко выраженный нелинейный вид с максимумом, который не описывается квадратичной зависимостью от расхода. При V ≈ 30 м/с формула даёт ΔP ≈ 0, что выходит за пределы рабочей зоны вентилятора и не используется в расчётах.

Влияние главной вентиляционной установки учитывалось путём задания фиксированного значения скорости потока на входной границе расчётной модели транспортного штрека.

Скорость воздуха на входе в выработку принята равной 0,2 м/с, что соответствует минимальному расходу воздуха, необходимому для поддержания проветривания выработки в период между сменами и при отсутствии активных горных работ. Это значение выбрано в качестве тестового режима для оценки влияния эжекторной установки в наиболее неблагоприятных условиях. Для проверки устойчивости результатов выполнены дополнительные расчёты при скоростях 1,0 и 2,0 м/с, соответствующих реальным режимам проветривания. Установлено, что качественная картина распределения скоростей и давления сохраняется, а количественное увеличение аэродинамического напора при центральном размещении установки составляет от 32 до 35 % в зависимости от входной скорости, что подтверждает применимость полученных закономерностей для широкого диапазона режимов проветривания.

Естественная шероховатость стенок горной выработки учитывалась введением дополнительного члена ΔB в функцию стенки [7, 8]:

$$u^+ = \frac{1}{k}\ln\left(Ey^+\right) - \Delta B; \tag{2}$$

$$\Delta B = \frac{1}{k}\ln\left(1 + \frac{K_s^+}{2}\right), \tag{3}$$

где: E=9,793, к=0,4 — константы модели; $y+=y_p u^*/\nu$ — безразмерное расстояние от стенки до центра пристеночной расчётной ячейки; $u+=u_p/u^*$ — безразмерная скорость в центре пристеночной ячейки; u* — скорость трения, м/с; ν — кинематическая вязкость воздуха, м²/с; y_p — физическое расстояние от стенки до центра пристеночной ячейки, м; u_p — физическая скорость воздушного потока в центре пристеночной ячейки, м/с.

Средняя высота шероховатости стенок выработки K_s была выбрана по результатам предварительных расчётов. Её значение принято соответствующим коэффициенту аэродинамического сопротивления α = 0,025 Н·с²/м⁴ (0,025 кг/м³), что соответствует горной выработке, пройденной буровзрывным способом. Связь между высотой выступов шероховатости $_{Ks}$ и коэффициентом аэродинамического сопротивления α устанавливалась на основе нормативного документа «Руководство по проектированию вентиляции угольных

шахт» (Макеевка-Донбасс, 1989) [14] и справочных данных для буровзрывного способа проходки. Для выработок большого поперечного сечения при K_s = 3 см и коэффициенте α = 0,025 Н·с²/м⁴ обеспечивается удовлетворительное согласование расчётных и экспериментальных данных по распределению скоростей. Размерность коэффициента аэродинамического сопротивления α = 0,025 Н·с²/м⁴ является общепринятой в рудничной аэродинамике и соответствует формуле

$$\Delta P = \alpha \cdot L \cdot P \cdot Q^2/S^3,$$

где L — длина выработки, P — периметр, S — площадь поперечного сечения, Q — расход воздуха.

Характерные размеры элементов расчётной области выбирались таким образом, чтобы минимизировать зависимость численных результатов от расчётной сетки (таблица 1). Это обеспечило практическую независимость полученного численного решения от плотности сетки.

Таблица 1. Основные параметры, принятые при численном моделировании

Параметр	Значение
Длина горной выработки, м	200
Площадь поперечного сечения горной выработки, м²	121
Высота горной выработки, м	11
Средняя шероховатость стенок горной выработки, см	3
Диаметр вентилятора, м	0,6
Диаметр камеры смешения, м	1,4
Длина камеры смешения, м	3
Расстояние от вентилятора до камеры смешения, м	1
Расстояние от вентилятора до боковой стенки выработки, м	1,6
Расстояние от вентилятора до почвы выработки, м	1,6
Скорость воздуха на входе в выработку, м/с	0,2
Интенсивность турбулентности входного воздушного потока, %	5

Как видно из рисунка 2, за эжекторной установкой вблизи кровли горной выработки формируется устойчивая циркуляционная вихревая зона. Её устойчивость поддерживается за счёт кинетической энергии эжектируемого воздушного потока.

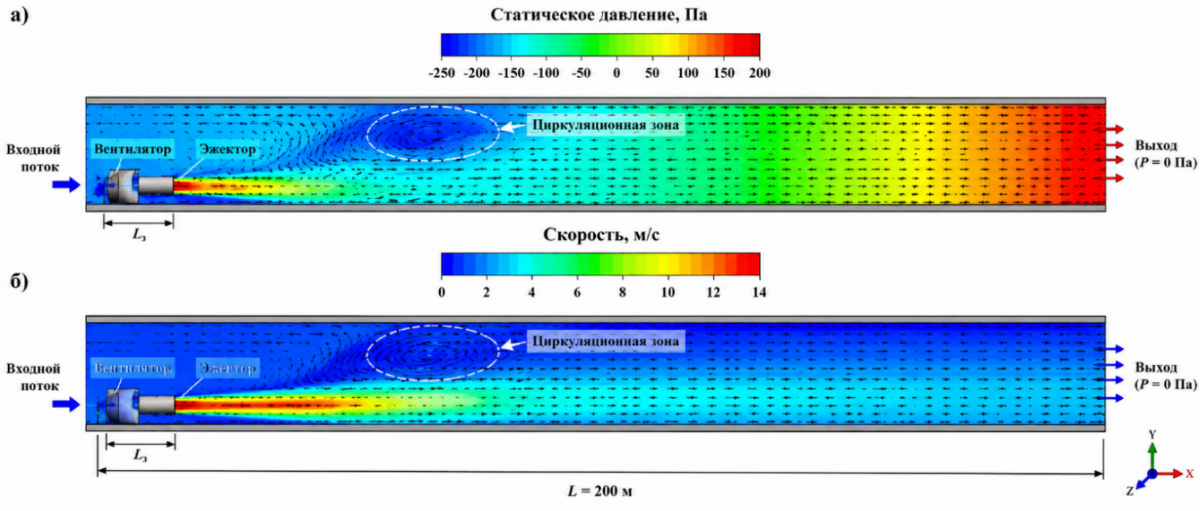


Рисунок 2. Распределение статического давления (а) и скорости воздушного потока (б) в среднем вертикальном продольном сечении транспортного штрека

Закономерности распределения полей скорости и давления, полученные в результате численного моделирования, в целом согласуются с результатами предыдущих численных исследований аэродинамических процессов эжекторных установок [19, 3]. Это подтверждает применимость принятой расчётной модели и граничных условий для описания формирования эжекторного потока в горной выработке.

Отдельно проанализирован процесс расширения воздушной струи, выходящей из эжектора, по поперечному сечению горной выработки (рис. 3). Для этого оценивалось распределение скорости воздуха в поперечных сечениях транспортного штрека, расположенных на различных расстояниях от камеры смешения. Такой анализ позволяет проследить переход от начальной высокоскоростной зоны эжекторной струи к её смешению с окружающим воздушным потоком.

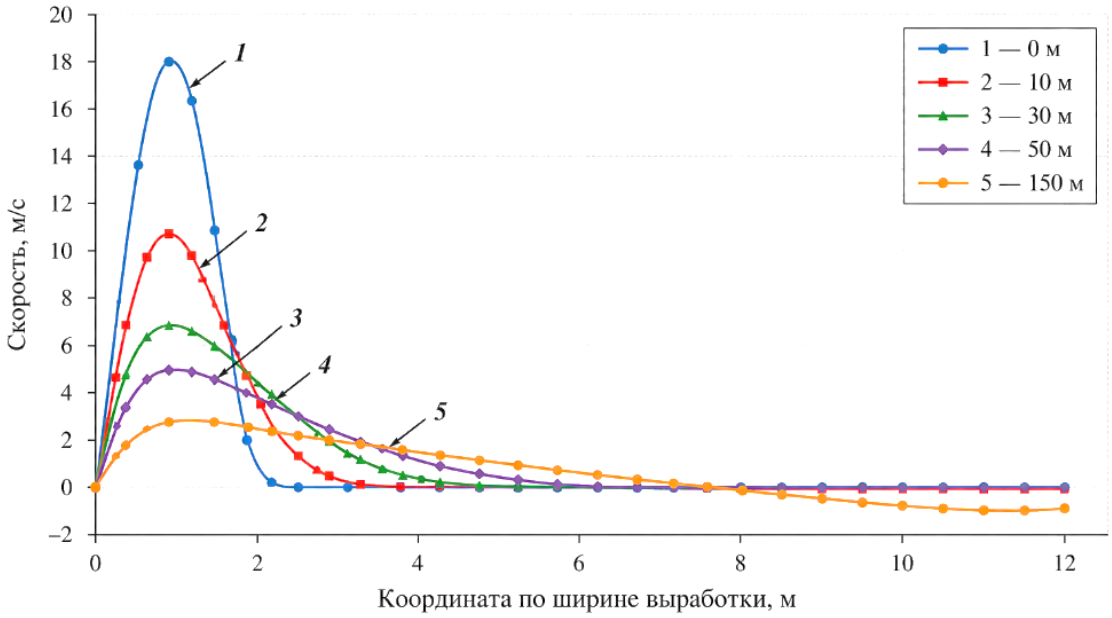


Рисунок 3. Распределение скоростей воздуха в поперечном сечении транспортного штрека при различном удалении от камеры смешения: 1 – 0 м, 2 – 10 м, 3 – 30 м, 4 – 50 м, 5 – 150 м

По оси абсцисс отложена координата по ширине выработки, м. Отсчёт ведётся от левой боковой стенки выработки (со стороны размещения эжекторной установки). Сечение смещено к боковой стенке выработки и проходит через ось вентилятора. Кривая 5 (150 м) показывает отрицательные значения скорости, что соответствует возвратному потоку. На графике возвратный поток обозначен штриховой линией.

Выбранное для анализа поперечное сечение смещено к боковой стенке выработки и проходит через ось вентилятора. Полученные результаты показывают, что динамический напор воздушной струи, создаваемой эжекторной установкой, в диапазоне 0–150 м за установкой оказывает существенное влияние на скорость движения воздуха во всех частях поперечного сечения выработки. В части выработки, противоположной стороне размещения эжекторной установки, наблюдается обратное движение воздушного потока. Максимальная скорость возвратного потока достигает 0,8 м/с.

В рамках исследования разработана численная модель, позволяющая определять аэродинамические параметры воздушного потока в трёхмерном пространстве горной выработки с эжекторной установкой, работающей в условиях отсутствия препятствий. Модель позволяет оценивать поля скорости и давления, взаимодействие воздушных потоков и особенности распространения эжекционной струи вдоль выработок большого поперечного сечения. Разработанная модель может применяться для определения эквивалентной напорной характеристики эжекторной установки в одномерных аэродинамических расчётах воздухораспределения шахтных вентиляционных сетей на основе первого и второго законов Кирхгофа.

Для получения эквивалентной напорной характеристики эжекторной установки в виде зависимости $\Delta P = f(Q)$ выполнена следующая процедура осреднения трёхмерных полей. В каждом поперечном сечении выработки, расположенном на расстоянии x от камеры смешения, вычислялись средние по площади значения статического давления $P_{ср}(x)$ и скорости $V_{ср}(x)$:

$$P_{\text{ср}}(x) = \frac{1}{S} \int_S P(x, y, z)\, dS \tag{4}$$

$$V_{\text{ср}}(x) = \frac{1}{S} \int_S V(x, y, z)\, dS \tag{5}$$

где S — площадь поперечного сечения выработки. Эквивалентный аэродинамический напор эжекторной установки определялся как разность средних статических давлений на выходе из камеры смешения и на входе в расчётную область:

$$\Delta P_{\text{экв}} = P_{\text{ср}}(x = 0) - P_{\text{ср}}(x = L) \tag{6}$$

Эквивалентный расход воздуха определялся как $Q = V_{ср} \cdot S$. По результатам расчётов для нескольких значений входной скорости (0,2; 1,0; 2,0 м/с) получена эквивалентная напорная характеристика эжекторной установки, аппроксимированная зависимостью:

$$\Delta P_{экв} = 1850 - 42,3Q + 0,87Q^2 \quad (7)$$

где $\Delta P_{экв}$ — эквивалентный напор, Па; Q — расход воздуха, м³/с. Формула справедлива в диапазоне расходов Q = 24…242 м³/с, соответствующем исследуемым режимам проветривания. Полученная зависимость может быть непосредственно использована в одномерных расчётах шахтных вентиляционных сетей для учёта влияния эжекторной установки.

На рисунке 4 представлена полученная эквивалентная напорная характеристика эжекторной установки в виде зависимости $\Delta P_{экв}$ = f(Q). Кривая построена по результатам численного моделирования для трёх значений входной скорости (0,2; 1,0; 2,0 м/с) и аппроксимирована полиномом второй степени (7). Характеристика имеет ниспадающий вид: с увеличением расхода воздуха Q эквивалентный напор $\Delta P_{экв}$ монотонно снижается, что качественно согласуется с типовыми напорными характеристиками вентиляторных установок. Полученная зависимость может быть непосредственно использована в одномерных расчётах шахтных вентиляционных сетей в качестве эквивалентной напорной характеристики эжекторной установки.

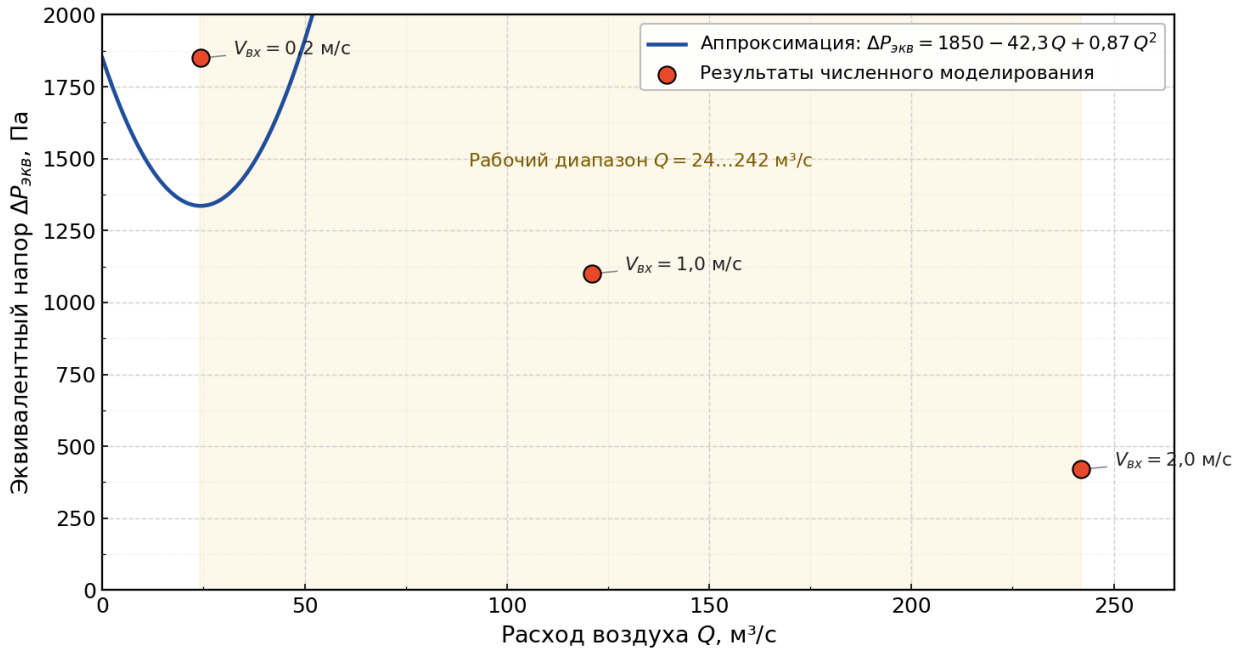


Рисунок 4. Эквивалентная напорная характеристика вентиляционно-эжекторной установки $\Delta P_{экв}$ = f(Q), полученная по результатам численного моделирования (точки — результаты расчётов при $V_{вх}$ = 0,2; 1,0; 2,0 м/с; линия — аппроксимация полиномом второй степени)

Численные исследования показали, что расположение эжекторной установки, наличие камеры смешения и её положение относительно вентилятора существенно влияют на аэродинамическую эффективность системы.

Заключение

Камеру смешения целесообразно размещать на расстоянии 0–1 м от выходного сечения вентилятора. Такое расположение обеспечивает эффективное использование кинетической энергии первичного воздушного потока и повышает аэродинамический напор эжекторной установки. При принятых параметрах зона существенного влияния эжекторного потока в горной выработке составляет около 150 м, в пределах которых он заметно воздействует на поле скоростей и воздухораспределение. В схеме без камеры смешения напор установки снижается примерно на 10 % по сравнению с вариантом, оснащённым камерой. Наиболее эффективным является размещение эжекторной установки в центральной части поперечного сечения горной выработки, что позволяет увеличить аэродинамический напор до 35 %. При размещении установки в средней части почвы выработки напор возрастает до 20 %. Таким образом, центральное расположение является наиболее рациональным с аэродинамической точки зрения. Разработанная процедура осреднения трёхмерных полей позволяет получить эквивалентную напорную характеристику эжекторной установки в виде зависимости $\Delta P = f(Q)$, которая может быть использована в одномерных расчётах шахтных вентиляционных сетей. Адекватность полученной характеристики подтверждается согласованием с результатами предыдущих исследований и данными натурных измерений.

Список литературы

1. Алыменко Д.Н. Работа вентиляционной установки комбинированного типа в рудничной вентиляционной сети: дисс. … канд. техн. наук. – Пермь. – 1999. – 159 с.
2. Алыменко Д.Н., Иванов А.А. Моделирование вентиляторной эжекторной установки // Актуальные проблемы военно-научных исследований. – 2025. – № 2 (34).
3. Алыменко Д.Н., Иванов А.А. Метод расчета числа Рейнольдса потоков воздуха при эжекционном процессе // Актуальные проблемы военно-научных исследований. – 2025. – № 1 (33).
4. Казаков Б.П., Шалимов А.В., Гришин Е.Л. Эжектирование возвратного потока воздуха для увеличения дальнобойности направленной в тупик воздушной струи // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – С. 27–36.
5. Кобылкин С.С. Обоснование метода расчёта параметров вентиляции шахт на основе объёмного моделирования аэрогазодинамических процессов: дисс. … канд. техн. наук. – Москва. – 2011. – 161 с.
6. Кобылкин С.С. Методологические основы системного проектирования вентиляции шахт: дисс. … д-ра техн. наук. – Москва: НИТУ МИСИС, 2018.
7. Кобылкин С.С. Обоснование метода расчета параметров вентиляции шахт на основе объемного моделирования аэрогазодинамических процессов: автореферат дисс. … канд. техн. наук. – Москва, 2011. – 20 с.
8. Кобылкин С.С. Обоснование метода расчёта параметров вентиляции шахт на основе объёмного моделирования аэрогазодинамических процессов: дисс. … канд. техн. наук. – Москва. – 2011. – 161 с.

9. Левин Л.Ю., Суханов А.Е., Исаевич А.Г. Увеличение энергоэффективности систем вентиляции калийных рудников путем реализации последовательного проветривания камер служебного назначения // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2023. – С. 93–106.
10. Медведев И.И. Рудничная вентиляция: справочник / под ред. К.З. Ушакова. – 2-е изд. – Москва: Недра, 1988. – 440 с.
11. Паршаков О. и др. Комплексное исследование газовой обстановки рудников // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2023. – С. 5–29.
12. Равшанов А.А., Нурхонов Х.А., Низомов Т.Н., Эштилавов С.А. Анализ математических моделей процесса эжекции в подземных горных выработках на основе закона сохранения // Цифровые технологии в промышленности. – 2025. – Т. 3, № 3. – С. 99–102.
13. Равшанов А.А., Нурхонов Х.А., Низомов Т.Н., Эштилавов С.А. Анализ математических моделей процесса эжекции // Цифровые технологии в промышленности. – 2025. – Т. 3, № 3. – С. 99–102.
14. Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт. – Макеевка-Донбасс. – Макеевка-Донбасс. – 1989.
15. Сафин Р.Г., Сотников В.Г. Совершенствование методов расчета эквивалентного напора эжекторных установок в горных выработках большого сечения // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – С. 185–195.
16. Семин М.А. Научные основы комплексного обеспечения безопасности при строительстве шахтных стволов с применением способа искусственного замораживания пород: дис.… д-ра техн. наук. – 2022.
17. Akbarnejad S., Ziabasharhagh M. Development of a Theoretical Model for Predicting Performance of a Gas Ejector in Different Boundary Conditions and Working Fluids // Thermal Engineering. – 2025. – Т. 72. – P. 8–16.
18. Kumar A. et al. A comprehensive exploration of ejector design, operational factors, performance metrics, and practical applications // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. – 2024. – Т. 46.
19. Shi D. et al. Experimental study on tail cavity flow and motion characteristics of continuous water exit of adjacent vehicles // Ocean Engineering. – 2026. – Т. 361.
20. Siddiqui M.A.H. et al. Maximizing energy savings in coal mines industrial ventilation: strategies and analysis for power reduction // Discover Applied Sciences. – 2025. – Т. 7.
21. Zheng L. et al. Modelling, optimization, and experimental studies of refrigeration CO2 ejectors: A review // Mathematics. – 2022. – Т. 10.

References

1. Alymenko D.N. [Operation of a combined-type ventilation unit in a mine ventilation network: dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences]. – Perm'. – 159 s. – 1999. (In Russ.).

2. Alymenko D.N., Ivanov A.A. [Modeling of a fan ejector unit] // Aktual'nye problemy voenno-nauchnykh issledovanij. – 2025. – No. 2 (34). (In Russ.).
3. Alymenko D.N., Ivanov A.A. [Method for calculating the Reynolds number of air flows during the ejection process] // Aktual'nye problemy voenno-nauchnykh issledovanij. – 2025. – No. 1 (33). (In Russ.).
4. Kazakov B.P., Shalimov A.V., Grishin E.L. [Ejection of the return air flow to increase the throw range of an air jet directed into a dead end] // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. – 2022. – Vol. 333. (In Russ.).
5. Kobylkin S.S. [Substantiation of a method for calculating mine ventilation parameters based on three-dimensional modeling of aerogasdynamic processes: dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences]. – Moskva. – 161 s. – 2011. (In Russ.).
6. Kobylkin S.S. [Methodological foundations of system design of mine ventilation: dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences]. – Moskva: NITU MISIS, 2018 (In Russ.).
7. Kobylkin S.S. [Substantiation of a method for calculating mine ventilation parameters based on three-dimensional modeling of aerogasdynamic processes: author's abstract of dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences]. – Moskva, 2011. – 20 s (In Russ.).
8. Kobylkin S.S. [Substantiation of a method for calculating mine ventilation parameters based on three-dimensional modeling of aerogasdynamic processes: dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences]. – Moskva. – 161 s. – 2011. (In Russ.).
9. Levin L.Yu., Sukhanov A.E., Isaevich A.G. [Increasing the energy efficiency of ventilation systems in potash mines by implementing sequential ventilation of service chambers] // Gornyj informatsionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal). – 2023. (In Russ.).
10. Medvedev I.I. [Mine ventilation: a reference book] / pod red. K.Z. Ushakova. – 2-e izd. – Moskva: Nedra, 1988. – 440 s (In Russ.).
11. [Comprehensive study of the gas conditions in mines] // Gornyj informatsionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal). – 2023. (In Russ.).
12. Ravshanov A.A., Nurkhonov Kh.A., Nizomov T.N., Eshtilavov S.A. [Analysis of mathematical models of the ejection process in underground mine workings based on the conservation law] // Tsifrovye tekhnologii v promyshlennosti. – 2025. – Vol. 3, No. 3. (In Russ.).
13. Ravshanov A.A., Nurkhonov Kh.A., Nizomov T.N., Eshtilavov S.A. [Analysis of mathematical models of the ejection process] // Tsifrovye tekhnologii v promyshlennosti. – 2025. – Vol. 3, No. 3. (In Russ.).
14. [Guide to designing the ventilation of coal mines]. – Makeevka-Donbass. – Makeevka-Donbass, 1989 (In Russ.).
15. Safin R.G., Sotnikov V.G. [Improvement of methods for calculating the equivalent head of ejector units in large-cross-section mine workings] // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. – 2024. – Vol. 335. (In Russ.).
16. Semin M.A. [Scientific foundations of comprehensive safety assurance in the construction of mine shafts using artificial rock freezing: dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences]. – 2022. (In Russ.).

17. Akbarnejad S., Ziabasharhagh M. Development of a Theoretical Model for Predicting Performance of a Gas Ejector in Different Boundary Conditions and Working Fluids // Thermal Engineering. – 2025. – Vol. 72. – P. 8–16.
18. Kumar A. et al. A comprehensive exploration of ejector design, operational factors, performance metrics, and practical applications // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. – 2024. – Vol. 46.
19. Shi D. et al. Experimental study on tail cavity flow and motion characteristics of continuous water exit of adjacent vehicles // Ocean Engineering. – 2026. – Vol. 361.
20. Siddiqui M.A.H. et al. Maximizing energy savings in coal mines industrial ventilation: strategies and analysis for power reduction // Discover Applied Sciences. – 2025. – Vol. 7.
21. Zheng L. et al. Modelling, optimization, and experimental studies of refrigeration CO2 ejectors: A review // Mathematics. – 2022. – Vol. 10.

Статья поступила в редакцию: 23.09.2026
Статья принята к публикации: 02.10.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 669.15+620.178.16

Влияние микроструктуры и карбидной морфологии высокохромистых белых чугунов на гидроабразивный износ

Очилов Азизжон Султонович
докторант
Навоийский государственный горно-технологический университет
Республика Узбекистан, г. Навои
E-mail: ochilovazizjon1996@gmail.com
Эгамбердиев Илхом Пулатович
DSc, заведующий кафедрой
Навоийский государственный горно-технологический университет
Республика Узбекистан, г. Навои
E-mail: ilkhom12041977@mail.com
Нажимов Комилжон Каххор у́гли
ассистент
Навоийский государственный горно-технологический университет
Республика Узбекистан, г. Навои
E-mail: najimovkomiljon92@gmail.com
Тожибоев Жамшидбек Низомжон у́гли
докторант
Навоийский государственный горно-технологический университет
Республика Узбекистан, Навои
E-mail: jamshidcapitan1604@gmail.com
Мамадияров Акмал Журакулович
PhD, доц.
Навоийский государственный горно-технологический университет
Республика Узбекистан, Навои
E-mail: amamadiyarov09@gmail.com

Influence of microstructure and carbide morphology of high-chromium white cast irons on hydroabrasive wear

Ochilov Azizjon Sultonovich
Doctoral candidate, Navoi State University of Mining and Technologies
Uzbekistan, Navoi
Egamberdiyev Ilkhom Pulatovich
DSc, Head of Department
Navoi State University of Mining and Technologies
Uzbekistan, Navoi

Библиографическое описание: Влияние микроструктуры и карбидной морфологии высокохромистых белых чугунов на гидроабразивный износ // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Очилов А.С. [и др.]. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23505

Komiljon Nakhimov Kahhor ugli
Assistant
Navoi State University of Mining and Technologies
Uzbekistan, Navoi
Tojiboyev Jamshidbek Nizomjon ugli
Doctoral Candidate
Navoi State University of Mining and Technologies
Uzbekistan, Navoi
Mamadiyarov Akmal Jurakulovich
PhD, Associate Professor
Navoi State University of Mining and Technologies
Uzbekistan, Navoi

Аннотация

Высокохромистые белые чугуны широко применяются в горном деле, металлургии и при изготовлении деталей насосного оборудования, работающих в условиях интенсивного абразивного и гидроабразивного воздействия. Целью настоящей статьи является систематизация научных данных о взаимосвязи микроструктуры, морфологии карбидных фаз и механизмов гидроабразивного износа высокохромистых белых чугунов. Основное внимание уделено M_7C_3-типу хромистых карбидов, их размеру, форме, пространственному распределению и характеру взаимодействия с металлической матрицей. На основе анализа опубликованных исследований рассмотрено влияние свойств абразивных частиц, их концентрации, скорости потока и угла воздействия на интенсивность изнашивания. Показано, что высокая твердость карбидной фазы сама по себе не обеспечивает максимальной износостойкости: существенное значение имеют морфология и ориентация карбидов, равномерность их распределения, а также устойчивость карбидно-матричной системы к локальному разрушению. Отмечено, что при повторном воздействии абразивных частиц возможны микрорезание, царапание, пластическая деформация, растрескивание и выкрашивание карбидов. Полученные на основе литературного анализа положения позволяют рассматривать управление микроструктурой как комплексную задачу, включающую оптимизацию химического состава, условий кристаллизации и термической обработки материала.

Abstract

High-chromium white cast irons are widely used in mining, metallurgy, and pump components operating under abrasive and hydroabrasive conditions. This article analyzes the relationship between microstructure, carbide morphology, and hydroabrasive wear mechanisms in high-chromium white cast irons. Particular attention is given to M_7C_3-type chromium carbides, their size, shape, distribution, and interaction with the metallic matrix. Based on a comparative analysis of published studies, the effects of abrasive-particle properties, concentration, flow velocity, and impact angle on wear intensity are considered. The analysis shows that wear resistance depends not only on the high hardness of carbide phases, but also on their morphology, distribution, and bonding with the metallic matrix. Repeated abrasive action may cause microcutting, scratching, plastic deformation, carbide cracking, and spalling. The reviewed results indicate that effective

microstructural control requires a comprehensive approach involving chemical composition, solidification conditions, and heat-treatment parameters to obtain a stable carbide–matrix structure with improved hydroabrasive wear resistance.

Ключевые слова: высокохромистый белый чугун, гидроабразивный износ, микроструктура, карбиды M_7C_3, морфология карбидов, металлическая матрица, абразивный износ.

Keywords: high-chromium white cast iron, hydroabrasive wear, microstructure, M_7C_3 carbides, carbide morphology, metallic matrix, abrasive wear.

Введение

В горнодобывающей, металлургической и химической промышленности гидроабразивные насосы широко используются для транспортировки жидкостей, содержащих твердые абразивные частицы. Повторные удары и скольжение частиц в потоке по деталям насоса приводят к их износу. Особенно интенсивный износ наблюдается в рабочих колесах, спиральном корпусе и защитных покрытиях.

Интенсивность гидроабразивного износа зависит от свойств абразивных частиц, скорости потока, угла удара и микроструктурного состояния материала[6]. Поэтому изучение механизмов износа имеет важное значение для увеличения срока службы деталей насоса. Цель данной статьи заключается в анализе основных механизмов износа, возникающих в деталях насоса в гидроабразивной среде, и влияющих на них факторов.

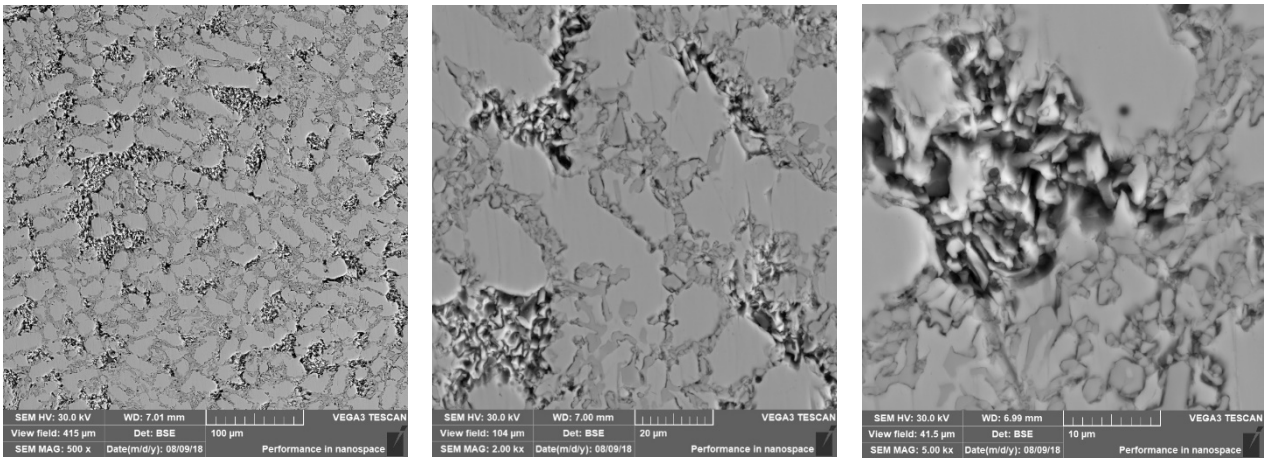
Материалы и методы исследования

Данная статья основана на анализе научных данных, касающихся микроструктуры, карбидных фаз и механизмов гидроабразивного износа высокохромистых белых чугунов. Основное внимание было уделено морфологии, размерам, распределению и влиянию на износ богатых хромом карбидных фаз. При анализе гидроабразивного износа учитывались свойства, концентрация, скорость потока и угол удара абразивных частиц. В имеющихся данных рассматриваются песок на основе SiO_2, концентрация ~20 %, скорость потока ~0,9 л/мин и углы удара 30°, 45°, 60° и 90° [1].

Изображения микроструктур использовались для морфологического и сравнительного анализа. Поскольку фазы невозможно точно идентифицировать только на основе изображения, было учтено, что для подтверждения фазы M_7C_3 необходимы инструментальные методы, такие как ЭДС или XRD. Исследование основано на сравнительном анализе взаимосвязи параметров микроструктуры-карбида-матрицы-абразивного потока. Карбидные фазы типа M_7C_3 могут ограничивать проникновение абразивных частиц в матрицу.

Результаты и обсуждение

На микроструктурных изображениях наблюдается наличие и распределение карбидных фаз в составе металлической матрицы. При увеличениях ×500, ×2000 и ×5000 их морфология и взаимное расположение с матрицей более четко проявляются. Размер, форма и распределение карбидов являются важными структурными факторами, влияющими на процесс износа [6, 2, 3, 7, 4, 8].



а) **б)** **в)**

Рисунок 1. Микроструктура высокохромистого белого чугуна при различных увеличениях: a) ×500; b) ×2000; c) ×5000

Влияние карбидов M_7C_3 на износ. Карбидные фазы типа M_7C_3 могут ограничивать проникновение абразивных частиц в металлическую матрицу. Однако их эффективность зависит не только от количества, но и от морфологии, размера, распределения и связи с матрицей. Крупные или неравномерные карбиды могут трескаться и выкрашиваться при повторных нагрузках [7, 10, 8]

Механизмы гидроабразивного износа. Абразивные частицы вызывают микроразрезы, царапины и пластические деформации на поверхности материала. Повторные удары могут привести к растрескиванию или выкрашиванию карбидов.

Влияние абразивных частиц и угла удара. Интенсивность износа зависит от размера, формы, твердости и концентрации частиц, скорости потока и угла удара. В существующих испытаниях изучались песок SiO_2, концентрация ~20 %, скорость потока ~0,9 л/мин и углы 30°, 45°, 60° и 90° [1]. В этих условиях изменение угла удара повлияло на потерю массы, однако результаты не могут быть оценены как универсальная закономерность для всех высокохромистых белых чугунов.

Высокохромистые белые чугуны также применяются в условиях, где абразивное воздействие может сочетаться с коррозионным фактором [5].

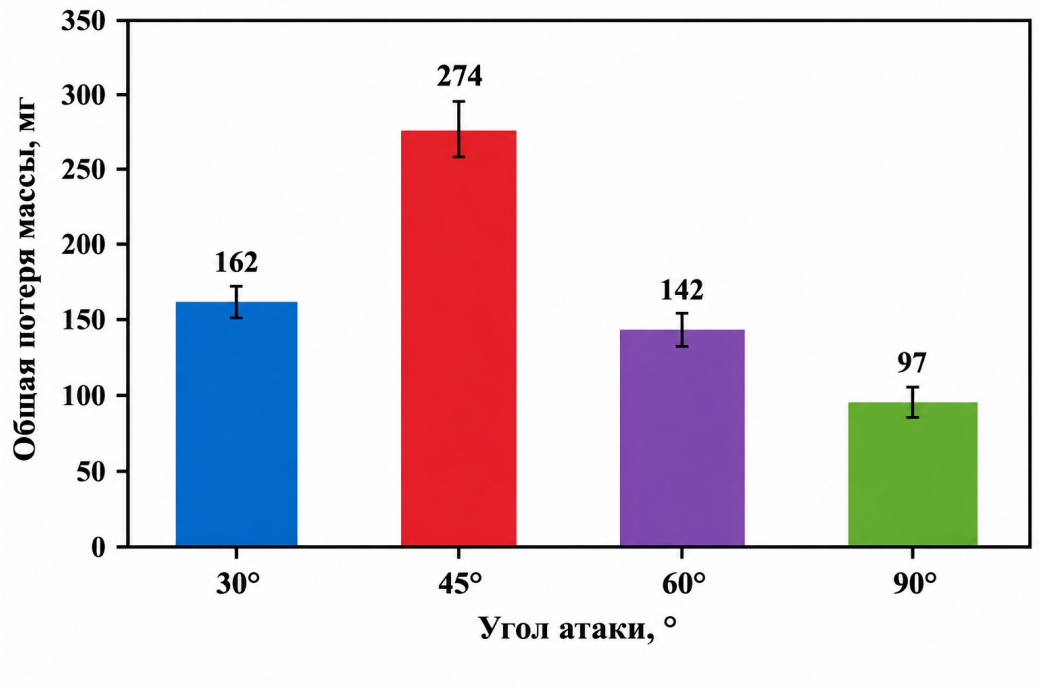


Рисунок 1. Влияние угла атаки абразивных частиц на общую потерю массы высокохромистого белого чугуна в условиях гидроабразивного износа (по данным [1])

Основные факторы, влияющие на износ

Фактор	Микроструктурная роль	Значение в процессе износа
Карбиды M_7C_3	Твердая структурная фаза	Абразив может ограничивать проникновение частиц в матрицу.
Морфология карбида	Устанавливает форму и размер	Влияет на микроразрез и карбидный излом
Распределение карбидов	Определяет структурную однородность.	Воздействует на местные центры напряжения и износа.
Матрица металлическая	Карбидоудерживающая среда	Влияет на устойчивость закрепления карбидов в металлической матрице.
Угол удара	Изменяет соотношение нормальной и тангенциальной нагрузок	Влияет на интенсивность износа.

Заключение

Проведенный анализ показал, что устойчивость высокохромистых белых чугунов к гидроабразивному износу определяется комплексом сложных микроструктурных и эксплуатационных факторов. Хотя карбиды хрома типа M_7C_3 являются важной фазой, защищающей материал от абразивного воздействия благодаря своей высокой твердости, их морфология, размер, распределение и состояние связи с металлической матрицей также играют важную роль в процессе износа. В гидроабразивной среде взаимосвязанно развиваются такие процессы, как микрорезание, царапина, пластическая деформация, эрозионное разрушение и разрушение или выкрашивание карбидов. Также свойства абразивных частиц, скорость потока и угол удара оказывают существенное влияние на

характер механизма износа. Поэтому при повышении износостойкости высокохромистых белых чугунов необходимо обеспечивать не только высокую твердость материала, но и оптимальное микроструктурное состояние карбидно-матричной системы [9, 10].

Список литературы

1. Chaves Pereira da Silva R., Barbosa P.R., Penagos J.J., Rodrigues da Costa A. Slurry erosion wear of high chromium cast iron samples from a slurry pump impeller: Effect of impact angle variation // World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences. – 2023. – T. 8, № 2. – P. 275–286. – DOI: 10.30574/wjaets.2023.8.2.0106.
2. Bedolla-Jacuinde A. Microstructure of high-chromium white irons: A review // Journal of Materials Science. – 2001. – T. 36. – P. 2857–2870.
3. Doğan O.N., Hawk J.A., Laird G. Solidification structure and abrasion resistance of high chromium white irons // Metallurgical and Materials Transactions A. – 1997. – T. 28, № 6. – P. 1315–1328. – DOI: 10.1007/s11661-997-0267-3.
4. Doğan O.N., Hawk J.A. Effect of carbide orientation on abrasion of high Cr white cast iron // Wear. – 1995. – T. 189, № 1–2. – P. 136–142. – DOI: 10.1016/0043–1648(95)06682-9.
5. Fashu S., Trabadelo V. Development and Performance of High Chromium White Cast Irons (HCWCIs) for Wear–Corrosive Environments: A Critical Review // Metals. – 2023. – T. 13, № 11. – Art. 1831. – DOI: 10.3390/met13111831.
6. Garber M.E. Wear-Resistant White Cast Irons: Properties, Structure, Technology, and Service. Moscow: Mashinostroenie, 2010. 280 P. (In Russ.).
7. Jaramillo R., Zambrano D.F., Valenzuela P., Gacitúa W., Rosenkranz A. Tribological Performance of High-Chromium Cast Irons: Effect of Chromium Content, Amount of Chromium Carbides (M_7C_3) and Loading Conditions on Wear Resistance // Tribology Letters. – 2025. – T. 73, № 3. – Art. 103. – DOI: 10.1007/s11249-025-02040-w.
8. Jilleh A., Kishore Babu N., Thota V., Anis A.L., Harun M.K., Talari M.K. Microstructural and wear investigation of high chromium white cast iron hardfacing alloys deposited on carbon steel // Journal of Alloys and Compounds. – 2021. – T. 857. – Art. 157472. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.157472.
9. Khamroev N., Egamberdiev I., Ashurov Kh., Asatov S., Khamidov B. Exploring the influence of the casting process, structural components and heat treatment on the mechanical properties of high-chromium cast irons: A review // AIP Conference Proceedings. – 2024. – T. 3244. – Art. 060021. – DOI: 10.1063/5.0241423.
10. Khamroev N., Egamberdiev I., Ashurov Kh., Ulugov G., Saibov M., Mamadiyarov A. Effect of Chromium Content and Heat Treatment Conditions on the Structure of Wear-Resistant White Cast Irons // Archives of Metallurgy and Materials. – 2026. – T. 71, № 1. – P. 253–261. – DOI: 10.24425/amm.2026.157786.

Статья поступила в редакцию: 16.10.2026
Статья принята к публикации: 21.10.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 669.213.6

Снижение расхода цианида натрия при сорбционном цианировании биокека

Санакулов Кувандик
д-р техн. наук, проф.
председатель правления-Генеральный директор АО Навоийский горно-металлургический комбинат
Республика Узбекистан, г. Навои
E-mail: babayevmirdodojon@mail.ru

Калонов Аваз Кахрамонович
ассистент
Навоийский государственный горно-технологический университет
Республика Узбекистан, г. Навои

Reducing sodium cyanide consumption in sorption cyanidation of biox-leach residue

Sanakulov Kuvondik
Dr. Tech. Sciences, Prof
Chairman of the Board – General Director JSC Navoi Mining and Metallurgical Company
Republic of Uzbekistan, Navoi

Kalonov Avaz Kakhramonovich
Assistant Professor
Navoi State Mining and Technological University
Republic of Uzbekistan, Navoi

Аннотация

Целью исследования является разработка и научно-техническое обоснование технологических решений по снижению непроизводительного расхода цианида натрия при сорбционном цианировании биокека. Установлено, что повышенный расход NaCN обусловлен наличием элементарной серы в жидкой фазе (образующей роданид-ионы по реакции $S^0 + CN^- \rightarrow SCN^-$) и остаточных сульфидных минералов (пирита, арсенопирита) в твёрдой фазе биокека. Лабораторные исследования проводились по двум независимым направлениям: 1) предварительная термообработка биокека в кислой среде (pH ≈ 1,8–2,0) при 90 °C в течение 20–30 минут, обеспечивающая окисление elemental-серы до сульфатов, снижение концентрации роданид-ионов с 4200 до 3100 мг/л и сокращение расхода NaCN с 21,6 до 15,7 кг/т (на 27,3 %) при сохранении извлечения золота на уровне 82,5 %; 2)

Библиографическое описание: Санакулов К., Калонов А.К. Снижение расхода цианида натрия при сорбционном цианировании биокека // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23595

двухстадийное сорбционное цианирование с введением нитрата свинца $Pb(NO_3)_2$ перед второй стадией. По сравнению с базовым одностадийным режимом (расход NaCN 27,19 кг/т, извлечение Au 83,3 %), оптимальный двухстадийный режим (1-я стадия: 2 ч, NaCN 500 мг/л; 2-я стадия: 14 ч, NaCN 1200 мг/л с добавкой 1,05 кг/т $Pb(NO_3)_2$) позволяет снизить расход цианида до 14,78 кг/т (на 45,6 %) при извлечении золота на стадии сорбции 76,1 %. Последующее доцианирование хвостов сорбции в течение 12 часов с дополнительным расходом NaCN 1,8 кг/т восстанавливает итоговое извлечение золота до сквозного уровня 83,3 %.

Abstract

The aim of the study is to develop technological solutions for reducing unproductive sodium cyanide consumption during sorption cyanidation of biooxidation residue. It has been established that increased NaCN consumption is caused by the presence of elemental sulfur in the liquid phase and residual sulfide minerals (pyrite, arsenopyrite) in the solid phase of the bioresidue. Laboratory studies were conducted in two directions: preliminary thermal treatment of the bioresidue in an acidic medium at 90 °C and two-stage sorption cyanidation with lead nitrate $Pb(NO_3)_2$ addition. Thermal treatment ensures a reduction in NaCN consumption from 21.6 to 15.7 kg/t (by 27.3 %) while maintaining gold recovery at 82.5 % and reducing SCN^- concentration from 4200 to 3100 mg/L. The two-stage regime with $Pb(NO_3)_2$ addition reduces specific cyanide consumption from 27.19 to 14.78 kg/t (by 45.6 %) with 76.1 % gold recovery during sorption, which reaches 83.3 % after additional cyanidation of tailings.

Ключевые слова: биокек, сорбционное цианирование, цианид натрия, роданид-ионы, термообработка, нитрат свинца, двухстадийное выщелачивание, извлечение золота.

Keywords: bioresidue, sorption cyanidation, sodium cyanide, thiocyanate ions, thermal treatment, lead nitrate, two-stage leaching, gold recovery.

Введение

Переработка упорных золотосодержащих руд остаётся одной из наиболее сложных задач современной гидрометаллургии [3]. Для извлечения золота из сульфидных концентратов применяется технология бактериального окисления с последующим сорбционным цианированием биокека. Однако в процессе эксплуатации установлено, что расход цианида натрия на стадии цианирования биокека в 5–10 раз превышает нормативные показатели, характерные для переработки неупорных руд и достигается 21,6–29,0 кг/т [1].

Целью настоящего исследования является разработка и научное обоснование технологических решений по снижению расхода цианистого натрия на взаимодействие с побочными веществами при сорбционном цианировании биокека. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: исследование минералогического состава биокека с выявлением основных источников неблагоприятного расхода цианида; определение причин расхода основной части NaCN на побочные реакции; разработка метода термической

обработки биокека в кислой среде; разработка двухстадийного режима сорбционного цианирования с добавлением нитрата свинца; оценка технико-экономической эффективности предлагаемых решений [8].

Материалы и методы

Объектом исследования являлись образцы биокека, отобранные из технологической цепи сорбционного выщелачивания гидрометаллургического завода. Биокек представляет собой продукт бактериального окисления золотосодержащего флотационного концентрата.

Для анализа состава использованы современные физико-химические методы: спектральный анализ, атомно-абсорбционная спектроскопия (ААС), масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS), сканирующая электронная микроскопия с энергодисперсионным анализом (СЭМ-ЭДС), пробирный анализ. Важно отметить, что метод СЭМ-ЭДС использовался строго для локального микроэлементного анализа и визуализации фазового контраста, тогда как минеральные фазы (пирит, арсенопирит, кварц) идентифицировались комплексно в сочетании с рентгенофазовым (РФА) и химическим фазовым анализом.

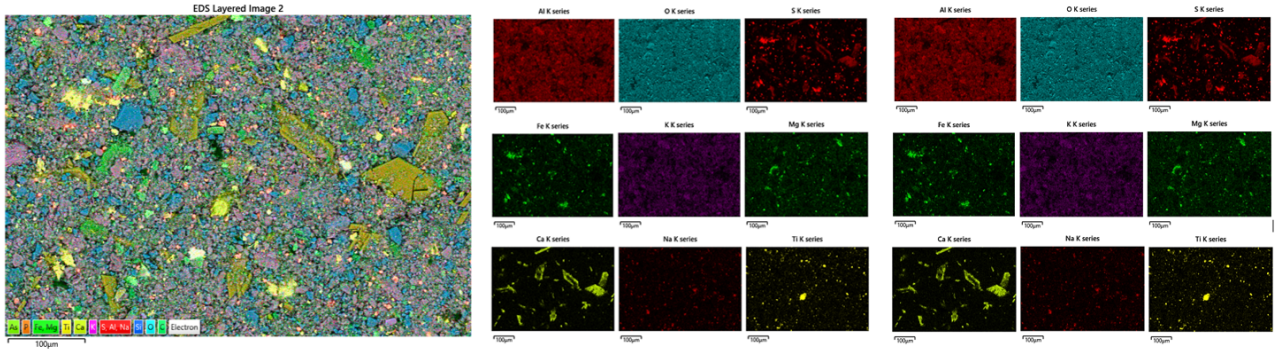


Рисунок 1. Результаты анализа питании Kemix (биокек)

Определение вещественного состава и размеров частиц проб выполнялось на сканирующем электронном микроскопе Thermo Fisher Scientific Apreo 2 S LoVac. Образцы анализировали в режиме низкого вакуума с использованием детектора обратного рассеяния электронов и кремниевого дрейфового детектора Oxford Instruments [4, с. 112–124]. Элементный анализ осуществлялись масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS, прибор PlasmaQuant MS Elite), атомно-абсорбционная спектроскопия (ААС), атомно-эмиссионная спектроскопия (квантометр АРЛ 31000). Теоретически и практически обосновано, что две основные причины неблагоприятного расхода цианистого натрия – элементарная сера в жидкой фазе и остаточные сульфидные минералы в твердой фазе – могут быть устранены с помощью двух независимых, взаимодополняющих технологических решений.

Таблица 1. Элементный состав общей площади проб в питания (биокек) проба №2, Спектр 46

Элемент	Видимая концентрация	Массовая доля, %	Минералы
C	3,60	18,06	C Vit
O	35,03	26,48	SiO_2
Na	0,46	0,31	Albite
Mg	0,80	0,57	MgO
Al	5,50	3,44	Al_2O_3
Si	14,16	8,25	SiO_2
S	38,73	21,33	FeS_2
K	2,03	1,08	KBr
Ca	0,54	0,28	Wollastonite
Ti	0,48	0,29	Ti
Fe	32,30	19,16	Fe
As	1,52	0,75	InAs
Total		100,00	

Лабораторные эксперименты по сорбционному цианированию проводились в пачуках объёмом 1,5 л при следующих технологических параметрах: Т:Ж = 1:2,77; pH = 10,5–10,6; загрузка активированного угля — 10 % от объёма пульпы; плотность пульпы — 1200 г/л; продолжительность сорбции — 16 часов.

Для определения форм элементарная сера (S^0) использовались экстракционные методы (экстракция тетрахлорэтиленом/сульфитом натрия с последующим йодометрическим титрованием), сульфатная сера ($S\text{-}SO_4^{2-}$) - солянокислой экстракцией с весовым окончанием $BaSO_4$, сульфидная сера (S^{2-}) - по разности между $S_{общ}$ и (S^0 + $S\text{-}SO_4^{2-}$).

Все лабораторные эксперименты проводились в реакторах (пачуках) объёмом 1,5 л при Т:Ж = 1:2,77, pH = 10,5–10,6 (поддерживалось известковым молоком), плотности пульпы 1200 г/л. В качестве сорбента использовался активированный уголь (фракция 1,2–2,4 мм) с загрузкой 10 % (насыпная плотность 0,45–0,50 г/см³). Интенсивность перемешивания составляла 250 об/мин, аэрация пульпы осуществлялась подачей очищенного воздуха с расходом 0,6 л/мин на 1 л пульпы. Концентрация NaCN поддерживалась в процессе выщелачивания титрованием и автоматической дозировкой рабочего раствора. Расход NaCN определялся по материальному балансу (сумма введенного NaCN за вычетом остаточного свободного NaCN в жидкой фазе хвостов).

Все опыты выполнялись в 5-кратной повторности. Погрешность измерений концентраций Au не превышала ±0,05 г/т, расхода NaCN — ±0,3 кг/т. Достоверность различий оценивалась с использованием t-критерия Стьюдента при доверительном уровне p = 0,95.

Результаты и обсуждение

Анализ состава биокека. Комплексными исследованиями установлено, что биокек характеризуется сложным полиминеральным составом. Содержание золота в питании процесса сорбционного выщелачивания составляет в среднем 33,5 г/т, серебра — 14,4 г/т, общая массовая доля серы достигает 6,9 %, органического углерода — 3,78 % [9].

Методом СЭМ-ЭДС идентифицированы формы нахождения серы: установлено наличие как элементарной серы (спектры с диффузным контрастом), так и сульфидной серы в составе пирита (FeS_2) и недоокисленного арсенопирита (FeAsS). Наличие свободной элементарной серы подтверждено результатами полуколичественного элементного анализа.

Анализ жидкой фазы продуктов сорбционного выщелачивания показал высокие концентрации роданид-ионов (SCN^-) — свыше 7000 мг/л во всех реакторах, а также повышенные концентрации железа (до 66 мг/л после первого реактора), меди (до 52,5 мг/л), цинка и кобальта [9].

На основе сопоставления данных по твёрдой и жидкой фазам научно обоснованы две основные причины нецелевого расхода цианистого натрия: первая — наличие элементарной серы в жидкой фазе, взаимодействие которой с CN^- приводит к образованию роданид-ионов по реакции $S^0 + CN^- \rightarrow SCN^-$; вторая — присутствие остаточных сульфидных минералов (пирита и арсенопирита) в твёрдой фазе [7].

В исходном биокеке общая сера ($S_{общ}$ = 3,37 %) распределена следующим образом: сульфидная S^{2-} = 2,15 %, элементарная S^0 = 0,82 %, сульфатная $S\text{-}SO_4^{2-}$ = 0,40 %. В процессе термообработки при 90 °C в кислой среде происходит гидротермальное окисление серы и частичное выщелачивание сульфидов: содержание S^0 снижается с 0,82 % до 0,11 %, а $S\text{-}SO_4^{2-}$ возрастает с 0,40 % до 1,08 %, что подтверждается падением pH пульпы с 2,2 до 1,8 по реакции:

$$2S^0 + 3O_2 + 2H_2O \rightarrow 2H_2SO_4$$

Именно снижение содержания элементарная серы с 0,82 % до 0,11 % непосредственно доказывает предотвращение реакции роданидообразования.

Термообработка биокека в кислой среде. Для подавления первой установленной причины повышенного расхода NaCN исследована предварительная термообработка биокека в кислой среде. Технологический режим предусматривает: температуру обработки 90 °C, кислотность среды pH ≈ 2,0, продолжительность обработки 20–30 минут [11, с. 88–96].

Таблица 2. Результаты сорбции биокека с предварительной термообработкой

№	Состав исх. пробы			Au хв. сорбции, г/т	Изв. Au, %	Расход NaCN, кг/т	Жидкая фаза		Температура нагрева, ^{0}C
	Au, г/т	S_s, %	$C_{ор}$, %				NaCN, мг/л	CNS, мг/л	
1	35,50	3,37	2,88	5,30	85,1	21,11	2352	3818	Без нагрева
2				5,52	84,4	16,95	2372	2271	5 min
3				5,30	85,1	15,56	2430	1788	10 min
4				5,06	85,7	14,52	2450	1498	20 min

На серии проб с исходным содержанием золота 38,3 г/т аналогично получено: без нагрева — расход NaCN 21,6 кг/т, SCN^- 4200 мг/л, извлечение Au 82,4 %; при нагреве 90 °C — расход NaCN 15,7 кг/т, SCN^- 3100 мг/л, извлечение Au 82,5 %. В процессе термообработки наблюдалось снижение pH среды с 2,2 до 1,8, что свидетельствует о протекании окислительной реакции с образованием сульфат-ионов. Предложено аппаратурное решение — размещение теплообменного змеевика внутри существующих технологических колонн, что позволяет минимизировать капитальные затраты и изменения действующей схемы [6].

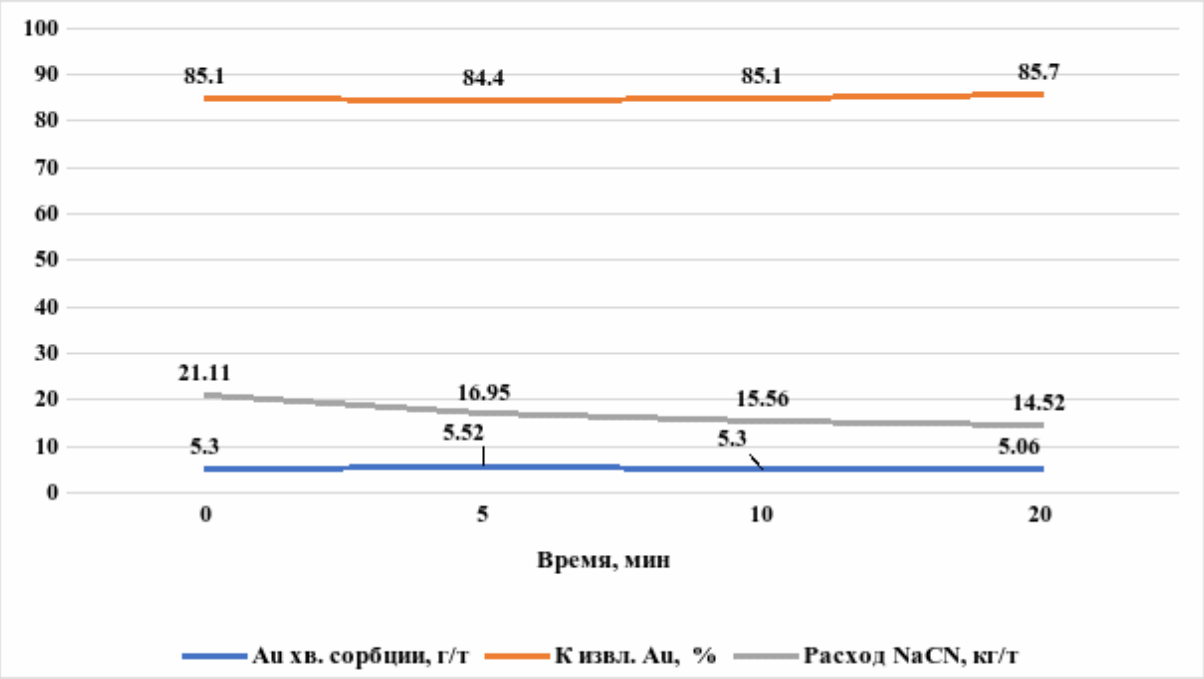


Рисунок 2. Зависимость расхода цианида натрия и степени извлечения золота при КЕМИХ биокека ГМЗ-3 от времени термообработки

Как видно из рисунок 2, нагрев биокека до 90 °C позволяет снизить концентрацию роданид-ионов в 2,5 раза (с 3818 до 1498 мг/л), а расход NaCN — с 21,11–21,60 до 14,52–15,70 кг/т (на 27,3 %) при полном сохранении извлечения золота (82,5–85,7 %).

Двухстадийное сорбционное цианирование с $Pb(NO_3)_2$. Для подавления второй причины повышенного расхода NaCN — взаимодействия цианида с остаточными сульфидными минералами — разработан метод двухстадийного сорбционного цианирования с введением нитрата свинца в качестве пассивирующего реагента.

Стадия 1: 2 часа, концентрация NaCN 500 мг/л (селективное растворение свободного золота).

Стадия 2: 14 часов, концентрация NaCN 1200 мг/л с введением нитрата свинца $Pb(NO_3)_2$.

Установлено, что введение Pb $(NO_3)_2$ до второй стадии более эффективно, чем на первой стадии: при той же дозе 2,10 кг/т извлечение золота увеличилось с 76,4 % до 77,1 %.

Таблица 3. Результаты опытов по двух стадиальной сорбции биокека с добавлением нитрата свинца

№	Режим / Точка ввода $Pb(NO_3)_2$	Доза Pb, кг/т	Au_хв.сорб, г/т	Au_ж.ф.хв, мг/л	CNS^- в хв., мг/л	Извл. Au сорб., %	Расход NaCN, кг/т
1	Базовый (одностадийный)	0	6,32	0,023	5365	83,3	27,19
2	Опыт №1 (добавка перед 1 ст.)	1,05	9,08	0,170	4350	76,1	14,78
3	Опыт №2 (добавка перед 1 ст.)	1,05	9,16	0,120	4834	75,9	15,58
4	Опыт №3 (добавка перед 2 ст.)	2,10	8,68	0,095	5269	77,1	16,62
5	Опыт №4 (добавка перед 2 ст., NaCN 500/500)	1,05	8,62	0,110	5704	77,3	18,14
6	Опыт №5 (добавка перед 1 ст.)	2,10	8,96	0,130	5075	76,4	16,19
7	Опыт №6 (добавка перед 1 ст., NaCN 500/1500)	1,05	9,04	0,120	5172	76,2	17,11

Сравнение Опыта №3 и Опыта №5 (при одинаковой дозе $Pb(NO_3)_2$ = 2,10 кг/т) показывает, что при введении реагента непосредственно перед 2-й стадией извлечение золота увеличивается с 76,4 % до 77,1 % (на 0,7 процентного пункта), а содержание Au в жидкой фазе снижается с 0,130 до 0,095 мг/л. Статистическая обработка результатов (3 повторности, s = 0,12 %) подтвердила значимость данного различия ($t_{расч} = 3,18 > t_{крит}(0,05; 4) = 2,78$). Это объясняется тем, что на 1-й стадии ионы свинца не расходуются на взаимодействие с легкорастворимыми компонентами, а направленно пассируют свежее скрытые поверхности сульфидов перед интенсивным растворением упорного золота на 2-й стадии. При двухстадийном режиме (Опыт №1) расход NaCN на сорбции снижается на 45,6 % (с 27,19 до 14,78 кг/т), однако извлечение Au снижается с 83,3 % до 76,1 %. В соответствии с технологической схемой ГМЗ-3, хвосты сорбции KEMIX направляются на стадию доцианирования (в течение 12 часов при концентрации NaCN 300–500 мг/л). Дополнительный расход NaCN на доцианировании составляет 1,80 кг/т. В результате итоговое (сквозное) извлечение золота достигает базового уровня 83,3 %. Итоговый расход NaCN по всему процессу составляет: 14,78 + 1,80 = 16,58 кг/т, что обеспечивает чистую экономию 27,19 – 16,58 = 10,61 кг/т NaCN (39,0 %).

Экспериментальные исследования проводились при Т:Ж = 1:2,77; pH = 10,5–10,6; загрузке активированного угля 10 % от объёма пульпы. Первая стадия — 2 часа при концентрации NaCN 500 мг/л; вторая стадия — 14 часов при концентрации NaCN 1200 мг/л. Общая продолжительность — 16 часов [2].

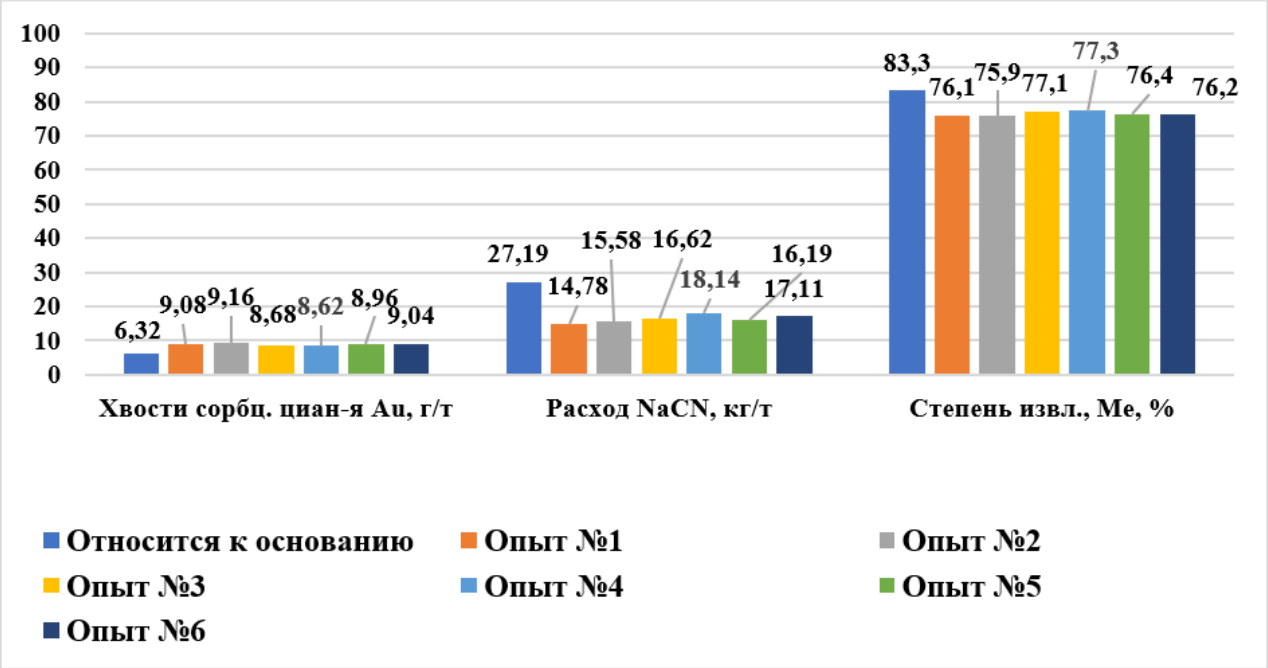


Рисунок 3. Взаимосвязь расхода цианида натрия при двухстадийной сорбции и степени извлечения золота в процессе КЕМИХ биокека ГМЗ-3

Результаты показали, что наименьший расход NaCN достигнут в опыте № 1 — 14,78 кг/т, что на 45,6 % ниже базового режима (27,19 кг/т). При этом извлечение золота составило 76,1 %, а последующее доцианирование хвостов обеспечивает доведение извлечения до базового уровня 83,3 %.

Впервые доказана возможность раздельного подавления двух независимых механизмов потерь NaCN на конкретном продукте бактериального окисления (биокеке) за счет сочетания гидротермального разрушения S^0 в кислой среде и стадийной пассивации сульфидов ионами свинца. Экспериментально установлено оптимальное место введения нитрата свинца. Доказано, что введение $Pb(NO_3)_2$ непосредственно перед второй стадией сорбционного цианирования более эффективно, чем на первой стадии: при одинаковой дозе 2,10 кг/т извлечение золота увеличилось с 76,4 % до 77,1 % [10].

Разработана схема цепи сорбционных аппаратов для реализации двухстадийной технологии, состоящая из шести последовательно соединённых пачуков. Первая стадия (пачуки № 1–№ 2): продолжительность 2 ч, концентрация NaCN 500 мг/л. Вторая стадия (пачуки № 3–№ 6): продолжительность 14 ч, концентрация NaCN 1200 мг/л, с введением $Pb(NO_3)_2$ в количестве 1,05 кг/т перед второй стадией [5, с. 101–121].

При производительности 1150 т/сут биокека годовая экономия NaCN по режиму Опыта №1 (1150 т/сут, 360 рабочих дней в году, цена NaCN 50 000 сум/кг, цена $Pb(NO_3)_2$ 80 000 сум/кг) с учётом затрат на $Pb(NO_3)_2$ составляется 34,78 млрд сум/год при этим обеспечивается чистый экономический эффект 222,11 млрд сум/год.

Заключение

1. Комплексными исследованиями вещественного и минералогического состава биокека научно обосновано, что повышенный расход NaCN (в 10 и более раз превышающий стехиометрически необходимый для растворения золота) обусловлен не целевым растворением благородных металлов, а побочными реакциями с элементарной серой жидкой фазы и остаточными сульфидными минералами твёрдой фазы.

2. Научно обоснована и экспериментально подтверждена эффективность двухстадийного режима сорбционного цианирования с дифференцированным распределением концентрации NaCN. Установлено, что введение $Pb(NO_3)_2$ непосредственно перед второй стадией более эффективно, чем на первой стадии.

3. Впервые доказано, что предварительная термообработка биокека в кислой среде при 90 °C приводит к окислению сульфидной серы до сульфат-ионов, снижению концентрации роданид-ионов с 4200 до 3100 мг/л и снижению расхода цианида натрия с 21,6 до 15,7 кг/т (на 27,3 %) при сохранении извлечения золота на уровне 82,5 %.

4. Разработана схема цепи сорбционных аппаратов для реализации двухстадийной технологии, обеспечивающая рациональное распределение концентрации NaCN по стадиям, возможность введения $Pb(NO_3)_2$ в оптимальной точке технологической цепочки и равномерную сорбцию золота на активированном угле.

5. Выполнена технико-экономическая оценка предлагаемых решений. Установлено, что все исследованные двухстадийные режимы обеспечивают положительный чистый экономический эффект от 149,25 до 222,11 млрд сум/год. Наиболее перспективным для внедрения признан режим опыта № 1 (1-я стадия: NaCN 500 мг/л, 2 ч; 2-я стадия: NaCN 1200 мг/л, 14 ч; $Pb(NO_3)_2$ — 1,05 кг/т перед второй стадией).

Список литературы

1. Барченков В.В. О безвозвратных потерях цианида в процессе растворения золота и мерах по его снижению // Золотодобыча. – 2014. – № 6 (187). – С. 9–16.
2. Никитин А.Г., Волкова Е.А. Низкотемпературный обжиг биокеков: влияние на минералогию и цианируемость // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2024. – № 2. – С. 88–96.
3. Санакулов К.С. Теория и практика освоения переработки золотосодер-жащих упорных руд Кызылкумов. – Ташкент: ГП «НИИМР», 2014. – 297 с.
4. Санакулов К. К вопросу обоснования и разработки технологии переработки отходов горно-металлургических производств // Горный вестник Узбекистана. – 2009. – № 1. – С. 27–39.
5. Федоров В.К., Шнеерсон Я.М. Краткие итоги работы автоклавно-гидрометаллургического комплекса при переработке упорных концентратов // Цветные металлы. – 2020. – № 3. – С. 43–47.
6. Эргашев У.А. Научно-технические основы повышения эффективности переработки упорных и особо упорных золотосодержащих руд Кызылкумов: автореф. д-ра техн. наук. – Навои, 2016. – 80 с.

7. Jones L. The biooxidation and cyanidation of a refractory arsenical gold concentrate. – University of British Columbia. – 2009.
8. Larrabure G., Rodríguez-Reyes J.C.F. A review on the negative impact of different elements during cyanidation of gold and silver from refractory ores and strategies to optimize the leaching process // Minerals Engineering. – 2021. – T. 173. – DOI: 10.1016/j.mineng. 2021.107194.
9. Legodi W., Kweto B., Sandenbergh R.F. van Buuren C. Strategies for reducing cyanide consumption during cyanidation of BIOX® treated gold ores // International Mineral Processing Congress. – 2020. – P. 4–5.
10. Soto-Uribe J.C., Patiño F., Reyes I.A. Effect of lead nitrate addition on cyanide consumption in gold cyanidation of sulfide ores // Minerals. – 2023. – T. 13, № 5. – DOI: 10.3390/ min13050672.
11. Van Niekerk J.A. van Buuren C.B., Olivier J.W. Bioprocessing of Refractory Gold Ores: The BIOX, MesoTHERM, and ASTER Processes // Biomining Technologies. – 2022. – P. 67–88.

References

1. Barchenkov V.V. [On Irreversible Cyanide Losses During Gold Dissolution and Measures to Reduce Them] // Zolotodobycha. – 2014. – No. 6 (187). (In Russ.).
2. Nikitin A.G., Volkova E.A. [Low-Temperature Roasting of Bio-Cakes: Effect on Mineralogy and Cyanidability] // Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh. – 2024. – No. 2. (In Russ.).
3. Sanakulov K.S. [Theory and Practice of Developing the Processing of Refractory Gold-Bearing Ores of Kyzylkum]. – Tashkent: GP «NIIMR», 2014. – 297 s (In Russ.).
4. Sanakulov K. [On the Substantiation and Development of Technology for Processing Waste from Mining and Metallurgical Production] // Gornyj vestnik Uzbekistana. – 2009. – No. 1. (In Russ.).
5. Fedorov V.K., Shneerson Ya.M. Brief results of the autoclave-hydrometallurgical complex's work in processing persistent concentrates // Non-ferrous metals. – 2020. – P. 43–47. (In Russ.).
6. Ergashev U.A. [Scientific and Technical Foundations for Improving the Efficiency of Processing Refractory and Highly Refractory Gold-Bearing Ores of Kyzylkum: Abstract of a Dissertation for the Degree of Doctor of Technical Sciences]. – Navoi, 2016. – 80 s (In Russ.).
7. Jones L. The biooxidation and cyanidation of a refractory arsenical gold concentrate. – University of British Columbia. – 2009.
8. Larrabure G., Rodríguez-Reyes J.C.F. A review on the negative impact of different elements during cyanidation of gold and silver from refractory ores and strategies to optimize the leaching process // Minerals Engineering. – 2021. – Vol. 173. – DOI: 10.1016/j.mineng. 2021.107194.
9. Legodi W., Kweto B., Sandenbergh R.F. van Buuren C. Strategies for reducing cyanide consumption during cyanidation of BIOX® treated gold ores // International Mineral Processing Congress. – 2020. – P. 4–5.

10. Soto-Uribe J.C., Patiño F., Reyes I.A. Effect of lead nitrate addition on cyanide consumption in gold cyanidation of sulfide ores // Minerals. – 2023. – Vol. 13, No. 5. – DOI: 10.3390/min13050672.
11. Van Niekerk J.A. van Buuren C.B., Olivier J.W. Bioprocessing of Refractory Gold Ores: The BIOX, MesoTHERM, and ASTER Processes // Biomining Technologies. – 2022. – P. 67–88.

Статья поступила в редакцию: 26.09.2026
Статья принята к публикации: 02.10.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 622.775:661.185

DOI: 10.32743/UniTech.2026.151.10.23500

Нейтрализация сероводорода в продуктивных растворах при подземном выщелачивании урана: теоретическое и лабораторное исследование

Шаропов Кодиржон Рашид угли
ассистент кафедра техники и технологии добычи и переработки руд редких и радиоактивных металлов
Навоийский государственный горно-технологический университет
Республика Узбекистан, г. Навои
E-mail: qodirjonrashdovich@gmail.com

Халимов Илхом Убайдуллоевич
д-р техн. наук, проф.
кафедра техники и технологии добычи и переработки руд редких и радиоактивных металлов, Навоийский государственный горно-технологический университет
Республика Узбекистан, г. Навои
E-mail: halimov_i@bk.ru

Neutralization of hydrogen sulfide in pregnant solutions during in-situ uranium leaching: theoretical and laboratory studies

Sharopov Qodirjon Rashid o'g'li
Assistant
Department of Mining and Processing Technology of Ores of Rare and Radioactive Metals, Navoi State University of Mining and Technologies
Uzbekistan, Navoiy

Khalimov Ilkhom Ubaydulloyevich
doctor of Technical Sciences, Professor
Department of Mining and Processing Technology of Ores of Rare and Radioactive Metals, Navoi State University of Mining and Technologies
Uzbekistan, Navoiy

Аннотация

Целью настоящего исследования является разработка теоретических основ нейтрализации сероводорода (H_2S) в продуктивных растворах, образующихся при подземном выщелачивании урана, с использованием пероксида водорода (H_2O_2), и оценка данного подхода в лабораторных условиях. Экспериментальные исследования охватывали диапазон

Библиографическое описание: Шаропов К.Р.У., Халимов И.У. Нейтрализация сероводорода в продуктивных растворах при подземном выщелачивании урана: теоретическое и лабораторное исследование // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23500

стехиометрических соотношений H_2S:H_2O_2 от 1:0,5 до 1:2, что позволило установить зависимость степени нейтрализации сероводорода от дозы окислителя. В исследовании проанализировано влияние окислительно-восстановительного потенциала (Eh), системы Fe^{3+}/ Fe^{2+} и сульфидных минералов на образование и устойчивость H_2S. Предложен трёхстадийный механизм действия H_2O_2: непосредственное окисление H_2S и сульфид-ионов, окисление Fe^{2+} до Fe^{3+} и окисление U(IV) до U(VI). Лабораторные исследования выполнены на продуктивных растворах государственного предприятия «Навоийуран».

В результате применения H_2O_2 концентрация H_2S в продуктивном растворе снизилась с 160,3 мг/л до 0 мг/л, значение Eh повысилось со 100 до 500 мВ, а pH снизился с 6,9 до 6,3. В результате H_2S был полностью нейтрализован, а окислительное состояние раствора усилилось. Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологических регламентов управления химическим составом продуктивных растворов на предприятиях, эксплуатирующих сульфидсодержащие урановые месторождения методом подземного выщелачивания.

Abstract

The aim of this study is to develop the theoretical basis for the neutralization of hydrogen sulfide (H_2S) in pregnant solutions generated during in-situ uranium leaching using hydrogen peroxide (H_2O_2), and to evaluate this approach under laboratory conditions. The experiments covered a range of stoichiometric H_2S:H_2O_2 ratios from 1:0.5 to 1:2, which made it possible to establish the relationship between the degree of hydrogen sulfide neutralization and the oxidant dose. The study analyzed the effects of redox potential (Eh), the Fe^{3+}/Fe^{2+} system, and sulfide minerals on the formation and stability of H_2S. A three-stage mechanism of H_2O_2 action was proposed: direct oxidation of H_2S and sulfide ions, oxidation of Fe^{2+} to Fe^{3+}, and oxidation of U(IV) to U(VI). Laboratory studies were conducted using pregnant solutions from the State Enterprise Navoiyuran. As a result of H_2O_2 treatment, the H_2S concentration in the pregnant solution decreased from 160.3 mg/L to 0 mg/L, while the Eh value increased from 100 to 500 mV and the pH decreased from 6.9 to 6.3. Consequently, H_2S was completely neutralized, and the oxidizing state of the solution was enhanced. The results obtained can be used in developing process regulations for managing the chemical composition of pregnant solutions at enterprises operating sulfide-bearing uranium deposits by in-situ leaching.

Ключевые слова: подземное выщелачивание урана, продуктивный раствор, сероводород, пероксид водорода, окислительно-восстановительный потенциал, пирит, нейтрализация.

Keywords: in-situ uranium leaching, pregnant solution, hydrogen sulfide, hydrogen peroxide, redox potential, pyrite, neutralization.

Финансирование: Исследование выполнено на базе Навоийского государственного горно-технологического университета в рамках хозяйственного договора № 3 – 2024 от 8 августа 2024 года, заключённого с государственным предприятием «Навоийуран», по теме «Разработка технологии извлечения урана из месторождений со сложными горно-геологическими условиями».

Funding: The research was conducted at Navoi State University of Mining and Technologies within the framework of Economic Contract No. 3 – 2024 dated August 8, 2024, concluded with the State Enterprise «Navoiyuran», on the topic «Development of a technology for uranium extraction from deposits with complex mining and geological conditions.»

Введение

Подземное выщелачивание урана (ПВ) представляет собой геотехнологический способ, основанный на переводе минералов урана в раствор непосредственно в недрах с использованием выщелачивающего раствора и последующем извлечении образующегося продуктивного раствора на поверхность через систему скважин. Современные исследования показывают, что эффективность данного процесса зависит не только от состава выщелачивающего раствора, но и от минералогического состава руды, гидродинамических условий, процессов массообмена и окислительно-восстановительных реакций [2–6, 9].

В системах, содержащих сульфидные минералы, особенно пирит (FeS_2), изменение окислительно-восстановительного равновесия оказывает влияние на химическое состояние продуктивного раствора. Окисление пирита может приводить к увеличению расхода окислителя, изменению соотношения Fe^{2+} и Fe^{3+} и, тем самым, влиять на условия перехода урана в раствор [2, 3, 6, 9, 1]. В водной среде H_2S существует в равновесии между формами H_2S, HS^- и S^{2-}, соотношение которых зависит от значения pH. Современные исследования по окислению H_2S с использованием H_2O_2 показывают, что продукты окисления и расход реагента зависят от значений pH, Eh и концентрации сульфидов в растворе [7, 10–12]. В производственных условиях государственного предприятия «Навоийуран» управление физико-химическим состоянием продуктивных растворов, в частности снижение негативного влияния сульфидных компонентов, имеет важное практическое значение [8].

Целью исследования является определение эффективности снижения концентрации H_2S при различных дозах H_2O_2 в продуктивном растворе, обоснование теоретического механизма нейтрализации H_2S, а также оценка изменений показателей pH, Eh и концентрации урана.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования были выбраны продуктивные растворы, отобранные на 2-м геотехнологическом руднике Зафарабадского рудоуправления государственного предприятия «Навоийуран». Полевые пробы были отобраны из откачных скважин МСК-6 и МСК-13. Учитывая возможность улетучивания H_2S в газовую фазу после отбора пробы, анализу H_2S уделялось приоритетное внимание. Концентрация урана определялась

титриметрическим методом в соответствии с требованиями O'zDSt 0281:2006. Содержание H_2S определялось в лаборатории методом йодометрического титрования; значения pH и Eh фиксировались до и после эксперимента.

Лабораторный эксперимент проводился на 500 мл продуктивного раствора. В коническую колбу заливали 500 мл раствора, после чего вводили дозы 60 %-ного H_2O_2, соответствующие стехиометрическим соотношениям H_2S:H_2O_2 = 1:0,5; 1:1; 1:1,5 и 1:2. После добавления реагента колбу закрывали резиновой пробкой и перемешивали на магнитной мешалке DLAB MS7-H550-S со скоростью 500 об/мин в течение 1 минуты.

Степень снижения концентрации H_2S рассчитывалась по формуле:

$$\eta = (C_0 - C_1) / C_0 \times 100\ \% \quad (1)$$

где C_0 — концентрация H_2S до эксперимента, мг/л; C_1 — концентрация H_2S после эксперимента, мг/л. Для значения ≤5 мг/л степень снижения рассчитывалась как минимальная оценочная величина.

Результаты и обсуждения

Теоретические основы образования H_2S

Согласно теоретическому анализу, образование и накопление H_2S в продуктивном горизонте связано с усилением восстановительных условий среды. Снижение значения Eh повышает устойчивость Fe^{2+} и восстановленных форм серы. В результате может усиливаться образование H_2S, создаются условия для восстановления U(VI) до U(IV) и повторного осаждения урана.

Научная идея предлагаемого подхода заключается в управлении окислительно-восстановительным состоянием продуктивного раствора с помощью H_2O_2. H_2O_2 одновременно окисляет присутствующий H_2S и переводит Fe^{2+} в Fe^{3+}, тем самым способствуя повышению значения Eh системы. Это ограничивает формирование благоприятной восстановительной среды для повторного образования H_2S.

Трёхстадийный механизм действия H_2O_2

На основе термодинамических расчётов и данных литературы действие H_2O_2 в системе «сульфидный минерал — H_2S — уран» объясняется тремя взаимосвязанными стадиями.

Стадия 1 — непосредственное окисление сероводорода и сульфид-ионов. На начальном этапе H_2S реагирует с H_2O_2 с образованием элементарной серы:

$$H_2S + H_2O_2 \rightarrow S^0\downarrow + 2H_2O \quad (2)$$

При достаточном количестве H_2O_2 более глубокое окисление сульфидных форм может приводить к образованию сульфата:

$$HS^- + 4H_2O_2 \rightarrow SO_4^{2-} + 4H_2O + H^+ \quad (3)$$

$$S^{2-} + 4H_2O_2 \rightarrow SO_4^{2-} + 4H_2O \quad (4)$$

Стадия 2 — окисление двухвалентного железа. H_2O_2 окисляет Fe^{2+} до Fe^{3+}:

$$2Fe^{2+} + H_2O_2 + 2H^+ \rightarrow 2Fe^{3+} + 2H_2O \quad (5)$$

Образовавшийся Fe^{3+} окисляет U(IV) до U(VI), вновь переходя в Fe^{2+}:

$$UO_2 + 2Fe^{3+} \rightarrow UO_2^{2+} + 2Fe^{2+} \quad (6)$$

Повторно образовавшийся Fe^{2+} может вновь окисляться под действием H_2O_2 до Fe^{3+}. Таким образом формируется окислительно-восстановительный цикл в системе Fe^{3+}/Fe^{2+}.

Стадия 3 — непосредственное окисление четырёхвалентного урана. H_2O_2 в кислой среде может также выступать в качестве прямого окислителя при переводе U(IV) в состояние U(VI):

$$U^{4+} + H_2O_2 \rightarrow UO_2^{2+} + 2H^+ \quad (7)$$

$$UO_2 + H_2O_2 + 2H^+ \rightarrow UO_2^{2+} + 2H_2O \quad (8)$$

Таким образом, трёхстадийный механизм действия H_2O_2 одновременно охватывает три технологические функции: снижение концентрации H_2S, ограничение усиления восстановительной среды и содействие сохранению урана в растворе в окисленном состоянии. Однако полученные лабораторные результаты самостоятельно не доказывают повышение степени извлечения урана; для подтверждения данного вывода требуются специальные кинетические и балансовые эксперименты.

Результаты лабораторных исследований

Таблица 1. Результаты обработки 60 %-ным раствором H_2O_2

Реагент	Соотношение	H2O2 60% (мг)	V (мл)	До реакции				После реакции			
				pH	H2S (мг/л)	U (мг/л)	Eh (мВ)	pH	H2S (мг/л)	U (мг/л)	Eh (мВ)
H2O2	1:0,5	66,79	500	6,9	160,3	41	100	6,7	50	41	200
H2O2	1:1	133,58	500	6,9	160,3	41	100	6,6	20	41	300
H2O2	1:1,5	200,38	500	6,9	160,3	41	100	6,4	≤ 5	41	400
H2O2	1:2	267,17	500	6,9	160,3	41	100	6,3	0	41	500

С увеличением дозы H_2O_2 концентрация H_2S снижалась со 160,3 мг/л до 50; 20; ≤5 и 0 мг/л соответственно, что составило 68,8; 87,5; не менее 96,9 и 100 % снижения. При этом значение Eh возрастало со 100 до 200; 300; 400 и 500 мВ, а pH снижался с 6,9 до 6,7; 6,6; 6,4 и 6,3. Данные результаты свидетельствуют об усилении окислительных свойств раствора вследствие добавления H_2O_2.

В данной серии экспериментов концентрация урана оставалась на уровне 41 мг/л. Поэтому повышение степени извлечения урана под действием H_2O_2 в рамках настоящего эксперимента не может считаться доказанным. Полученные результаты подтверждают выводы о снижении концентрации H_2S и повышении Eh.

При соотношении H_2S:H_2O_2 = 1:2 было зафиксировано отсутствие аналитически определяемого H_2S. Однако данное значение относится исключительно к рассмотренным лабораторным условиям, и прежде чем принимать его в качестве окончательной оптимальной дозы для промышленного применения, необходимо провести повторные эксперименты с различными исходными концентрациями H_2S и расходом реагента.

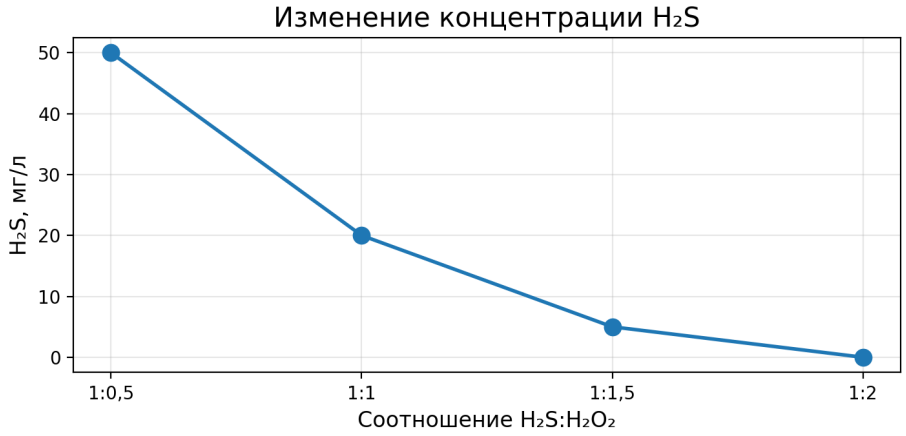


Рисунок 1. Изменение концентрации H_2S

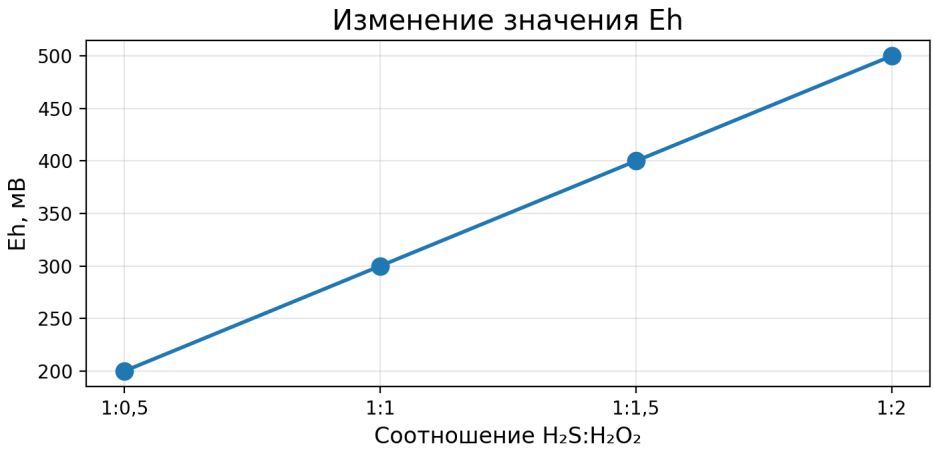


Рисунок 2. Изменение значения Eh

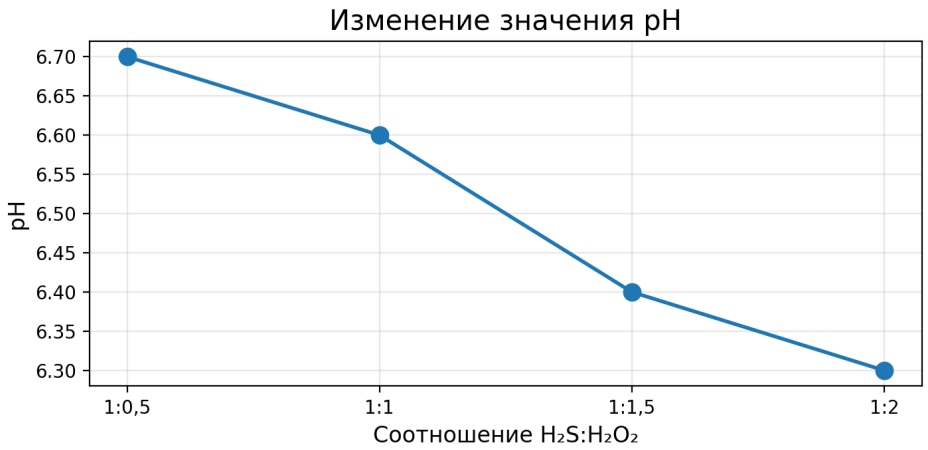


Рисунок 3. Изменение значения pH

Заключение

1. В продуктивных растворах, отобранных на 2-м геотехнологическом руднике Зафарабадского рудоуправления, содержание H_2S по исследованным скважинам варьировало в диапазоне 0–160,3 мг/л, при этом максимальное значение зафиксировано на скважине 45-7-26.

2. В результате применения доз 60 %-ного H_2O_2 в диапазоне 66,79–267,17 мг на 500 мл продуктивного раствора концентрация H_2S снизилась со 160,3 мг/л до 50; 20; ≤5 и 0 мг/л. Степень снижения H_2S составила соответственно 68,8; 87,5; не менее 96,9 и 100 %.

3. Снижение концентрации H_2S сопровождалось повышением Eh со 100 до 500 мВ и понижением pH с 6,9 до 6,3, что свидетельствует об усилении окислительных свойств раствора вследствие добавления H_2O_2.

4. Теоретически действие H_2O_2 объясняется тремя стадиями: окисление H_2S и сульфид-ионов; окисление Fe^{2+} до Fe^{3+} с формированием цикла Fe^{3+}/Fe^{2+}; окисление U(IV) до U(VI). Результаты лабораторных исследований по снижению H_2S и повышению Eh согласуются с данным механизмом, однако количественный вклад каждой отдельной стадии пока не определён.

5. При соотношении H_2S:H_2O_2 = 1:2 наблюдалось отсутствие аналитически определяемого H_2S. Данное значение получено в лабораторных условиях и не должно рассматриваться в качестве окончательной оптимальной дозы для промышленного применения. Для установления технологического режима необходимы повторные лабораторные и опытно-промышленные испытания.

Список литературы

1. Eglizaud N., Miserque F., Simoni E., Schlegel M., Descostes M. Uranium(VI) interaction with pyrite (FeS_2): Chemical and spectroscopic studies // Radiochimica Acta. – 2006. – T. 94, № 9–11. – P. 651–656. – DOI: 10.1524/ract.2006.94.9–11.651.

2. Fan Y., Song H., Wang Z., Gan N., Zhang C., Zhao B., Xu Z., Tan Y. The behavior of pyrite during in-situ leaching of uranium by CO_2 + O_2 // Ore Geology Reviews. – 2024. – T. 169. – Art. 106085. – DOI: 10.1016/j.oregeorev.2024.106085.
3. Kurmanseiit M.B., Tungatarova M.S., Royer J.-J., Aizhulov D.Y. et al. Streamline-based reactive transport modeling of uranium mining during in-situ leaching // Hydrometallurgy. – 2023. – T. 220. – Art. 106107. – DOI: 10.1016/j.hydromet.2023.106107.
4. Li G., Yao J. A Review of In Situ Leaching (ISL) for Uranium Mining // Mining. – 2024. – T. 4, № 1. – P. 120–148. – DOI: 10.3390/mining4010009.
5. Qiao P., Xiong S., Ge L., Song H., Yu H., Yang Y., Wang R., Kang S., Zhou Y., Fan Y. The influence of mineralogical characteristics and pH on uranium extraction via in-situ leaching: Preliminary case analysis of the Hadatu uranium deposit, China // Hydrometallurgy. – 2025. – T. 235. – Art. 106492. – DOI: 10.1016/j.hydromet.2025.106492.
6. Qiu W., Yang Y., Song J., Que W.-L., Liu Z., Weng H., Wu J., Wu J. What chemical reaction dominates the CO_2 and O_2 in-situ uranium leaching? // Applied Geochemistry. – 2023. – T. 148. – Art. 105522. – DOI: 10.1016/j.apgeochem.2022.105522.
7. Schovan S. et al. Remediation of Sulfides in Produced Waters of the Oil and Gas Industry Using Hydrogen Peroxide // Water. – 1987. – T. 16, № 14. – Art. 1987. – DOI: 10.3390/w16141987.
8. State Enterprise Navoiyuran. Structural divisions: Zafarabad Mining Administration [Electronic resource]. URL: https://navoiyuran.uz/uz/biznes-birliklari/ (дата обращения: 18.09.2026).
9. Wang B., Luo Y., Liu J. h., Li X., Zheng Z.-h., Chen Q.-q., Li L.-y., Wu H., Fan Q.-r. Ion migration in in-situ leaching of uranium: Field trial and reactive transport modelling // Journal of Hydrology. – 2022. – T. 615. – Art. 128634. – DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.128634.
10. Wulansari I., Sediawan W.B., Hidayat M. The Oxidation of Sulphide Compounds in the Order of Processing Sodium Hydrosulphides // Waste Technology. – 2023. – T. 11, № 1. – P. 42–51. – DOI: 10.14710/11.1.42–51.
11. Zhang C. et al. Electrochemical valorization of H_2S in natural gas to sulfate under mild conditions // Nature Communications. – 2025. – T. 16. – Art. 7175. – DOI: 10.1038/s41467-025-62445-y.
12. Zhou J., Li X. Removal of Gaseous H_2S by the Titanium Silicalite-1/H_2O_2 Wet Oxidation System // Energy & Fuels. – 2023. – T. 37, № 2. – P. 1169–1179. – DOI: 10.1021/acs.energyfuels.2c03067.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И РОБОТОТЕХНИКА

Статья поступила в редакцию: 26.09.2026
Статья принята к публикации: 02.10.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 623.442.58:519.224.2

DOI: 10.32743/UniTech.2026.151.10.23525

Кучность стрельбы на дальние дистанции: влияние разброса начальной скорости и БК на примере спортивной винтовки 33ХС

Богословский Владимир Николаевич
д-р. техн. наук
Российская Федерация, г. Москва
E-mail: vnbog@mail.ru

Long-range shooting precision: effects of muzzle velocity and BC variation in a 33XC sporting rifle

Bogoslovsky Vladimir Nikolaevich
Dr. Tech. Sciences,
Russian Federation, Moscow

Аннотация

В статье исследуется влияние технической кучности спортивной винтовки калибра 33ХС, разброса начальной скорости и баллистического коэффициента (BC) пули Berger .338 300 gr на суммарную угловую кучность в диапазоне дистанций 100–2500 м. В представленных расчётных сценариях показано, что на дистанциях до 1000–1500 м винтовка 33ХС, настроенная на более высокую техническую кучность, обладает очевидным преимуществом. Однако по мере увеличения дальности возрастает вклад в угловое рассеивание разброса скорости и BC, а вклад технической кучности снижается. Нелинейный характер влияния разброса скорости и BC связан с различиями во времени полёта и интенсивности торможения пуль на одинаковых по длине участках траектории.

Основной результат исследования состоит в выявлении предельной дистанции применения данного калибра и пули в 1500–2000 м, при которой вклад технической кучности в суммарную кучность еще высок, и вклад зависящих от дальности параметров пули еще не привел к неприемлемо большому рассеиванию облака пропаданий.

Библиографическое описание: Богословский В.Н. Кучность стрельбы на дальние дистанции: влияние разброса начальной скорости и БК на примере спортивной винтовки 33ХС // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23525

Статья будет полезна разработчикам спортивных винтовок и боеприпасов к ним, спортсменам-стрелкам, охотникам, а также всем любителям высокоточной спортивной стрельбы из нарезного оружия.

Работа выполнена в интересах мирового спортивного стрелкового сообщества по инициативе авторов и на их собственные средства, с использованием открытых источников информации.

Abstract

This article investigates the effects of the intrinsic precision of a 33XC target rifle, variations in muzzle velocity, and variations in the ballistic coefficient (BC) of the Berger .338 300 gr bullet on overall angular dispersion at distances of 100–2500 m. The computational scenarios presented demonstrate that, at distances of up to 1000–1500 m, a 33XC rifle tuned for greater intrinsic precision offers a clear advantage. However, as range increases, muzzle velocity and BC variations contribute increasingly to angular dispersion, while the relative contribution of intrinsic rifle precision decreases. The nonlinear effects of muzzle velocity and BC variations are associated with differences in flight time and deceleration over trajectory segments of equal length.

The principal finding of the study is the identification of a limiting effective range of 1500–2000 m for this cartridge and bullet combination, within which intrinsic rifle precision still makes a substantial contribution to overall precision, while range-dependent effects of bullet parameter variations have not yet caused an unacceptably large spread of impact points.

The article will be useful to designers of target rifles and ammunition, competitive shooters, hunters, and all enthusiasts of precision rifle shooting.

The study was undertaken on the authors’ initiative and funded entirely by them for the benefit of the global shooting sports community, using publicly available information.

Ключевые слова: Ключевые слова: спортивная винтовка, 33XC, внешняя баллистика, кучность, угловое рассеивание, начальная скорость пули, баллистический коэффициент, G7, стандартное отклонение, экстремальный размер группы, статистическое моделирование, ELR.

Keywords: sporting rifle, 33XC, external ballistics, precision, angular dispersion, muzzle velocity, ballistic coefficient, G7, standard deviation, extreme spread, statistical modeling, ELR.

Введение

В связи с ростом популярности соревнований в классе ERL (Extra Long Range) появляются все более совершенные образцы спортивных винтовок крупного калибра. Например, в опубликованных испытаниях комплекса Specter в калибре 33XC компании BespokeGun при настройке в трех точках подряд получен размер групп из трех выстрелов 0,09, 0,26 и 0,17 MOA, средний размер — 0,173 MOA [1]. Схожие результаты получены для комплекса Monolith 33XC, у которого кучная полка включила семь посадок с шагом 0.003” со средней кучностью 0,187 MOA, что для ELR системы считается очень сильным результатом. Вместе с тем такие винтовки предназначены для стрельбы на сверхдальние дистанции. В дисциплине ELR с ними проводятся соревнования King of 1 Mile и King of 2 Miles [13]. Это

делает весьма актуальным исследование зависимости кучности спортивных винтовок в калибре 33XC от дистанции и, в частности, влияния разброса начальной скорости пули и баллистического коэффициента (BC) на изменение кучности с ростом дистанции.

Цель статьи – построить модель статистического рассеивания точек попаданий на разных дистанциях на основе уравнений внешней баллистики, провести исследование вклада технической кучности спортивной винтовки в калибре 33XC, разброса начальной скорости и баллистического коэффициента пули Berger .338 300 gr в суммарную угловую кучность в диапазоне дистанций 100–2500 метров и определить предельную дистанцию для этих калибра и пули.

Материалы и методы

В спортивных винтовках калибра 33XC чаще всего применяются матчевые пули массой 300 gr, в основном, Berger .338 300 gr Hybrid OTM Tactical и Hornady .338 300 gr A-Tip Match [1, 4, 14]. Исследование проведено для пули Berger 300 gr. Для исследований применялись модели, разработанные на основе современной теории внешней баллистики, встроенные в статистические модели.

Настройка спортивной винтовки на экстремальную кучность как правило ведётся в контролируемых условиях на дистанции 100 метров. Кучность на этой дистанции преимущественно определяется конусом разлёта пуль из ствола. Однако на дальних дистанциях дополнительно появляется целый набор факторов, главными из которых являются разброс начальной скорости и баллистического коэффициента, изменение ветра между выстрелами, мираж. Различие роли углового рассеивания и внешних условий на коротких и дальних дистанциях рассматривается, в частности, в материалах Berger [4]. Наше исследование посвящено двум управляемым факторам – скорости и баллистическому коэффициенту (BC).

Важно учитывать, что кучность изменяют случайные изменения от выстрела к выстрелу. Постоянная систематическая ошибка, одинаково смещающая все попадания, смещает СТП, но не изменяет размер группы [2, 3].

Обобщённая модель кучности

В работе в качестве основного показателя кучности использовано стандартное отклонение координат точек попадания от СТП. Для вертикали формулу кучности можно записать в виде:

$$\sigma_{\Sigma}^2(L) = \sigma_{\text{тех}}^2 + \sigma_{V0}^2(L) + \sigma_{BC}^2(L) + \sigma_{\text{ветер}}^2(L) + \sigma_{\rho}^2(L) + +\sigma_{\text{прицел}}^2(L) + \ldots$$

или в более строгом виде:

$$\sigma_{\Sigma}^2(L) = \sum_i [K_i(L)\sigma_i]^2 + 2\sum_{i<j} K_i(L)K_j(L)Cov(i,j)$$

где $K_i(L)$— чувствительность попадания к данному фактору на дистанции L. Использование коэффициентов чувствительности и учёт ковариаций соответствуют общему закону распространения неопределённости [18].

Для оценки влияния на вертикальную составляющую кучности разброса начальной скорости и баллистического коэффициента необходима модель внешней баллистики.

Полная 6DOF-модель внешней баллистики

Полная модель с шестью степенями свободы учитывает поступательное движение и изменение ориентации пули [15]. Примем систему координат: x— вперёд по линии стрельбы, y— вправо, z— вверх. Состояние пули:

$$\mathrm{X} = [\mathrm{r}, , \mathrm{v}, \ q\ \omega] ,$$

где r— координаты центра масс, v— скорость центра масс, q— кватернион ориентации пули, $\omega = (p, q_b, r_b)$— угловая скорость в связанной с пулей системе координат. Индекс q_b пишем отдельно, чтобы не путать с кватернионом q. Базовая система уравнений:

$$\dot{\mathrm{r}} = \mathrm{v}$$

$$m\dot{\mathrm{v}} = m\mathrm{g} + \mathrm{F}_A + \mathrm{F}_{Magnus} + \mathrm{F}_{wind}$$

$$\dot{q} = \frac{1}{2}\, q \otimes \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \end{bmatrix}$$

$$\mathrm{I}\dot{\omega} + \omega \times (\mathrm{I}\omega) = \mathrm{M}_A + \mathrm{M}_{Magnus} + \mathrm{M}_{roll}$$

Для осесимметричной пули:

$$\mathrm{I} = \begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_y \end{bmatrix}$$

Относительная скорость воздуха:

$$\mathrm{v}_r = \mathrm{v} - \mathrm{W}$$

$$V = \| \mathrm{v}_r \|, \ M = \frac{V}{a}, \ \bar{q} = \frac{1}{2}\rho V^2, \ S = \frac{\pi d^2}{4}$$

где W— вектор ветра, M— число Маха, a— скорость звука, $\bar{q}$— динамическое давление, S— площадь поперечного сечения пули.

Если e_x— единичный вектор продольной оси пули, полученный из кватерниона ориентации, то малый вектор угла атаки и рыскания можно записать как:

$$\alpha_v = \mathrm{e}_x - \left(\mathrm{e}_x \cdot \hat{\mathrm{v}}_r\right) \hat{\mathrm{v}}_r$$

$$\alpha \approx \| \alpha_v \|$$

Аэродинамические силы в компактной форме:

$$\mathrm{F}_D = -\bar{q} S C_D (M, \alpha) \hat{\mathrm{v}}_r$$

$$\mathrm{F}_N = \bar{q} S C_{N\alpha}(M) \alpha_v$$

$$\mathrm{F}_{Magnus} = \bar{q} S C_{Yp\alpha}(M) \frac{pd}{2V} \left(\mathrm{e}_x \times \hat{\mathrm{v}}_r \right)$$

Итого:

$$\mathrm{F}_A = \mathrm{F}_D + \mathrm{F}_N + \mathrm{F}_{Magnus}$$

Моменты:

$$\mathrm{M}_{pitch/yaw} = \bar{q} S d \left[C_{M\alpha}(M) \alpha_b + C_{Mq}(M) \frac{d}{2V} \omega_{\perp b} \right]$$

$$\mathrm{M}_{roll} = \bar{q} S d C_{Lp}(M) \frac{pd}{2V} \mathrm{e}_{x,b}$$

$$\mathrm{M}_{Magnus} = \bar{q} S d C_{Mp\alpha}(M) \frac{pd}{2V} \alpha_b$$

Здесь α_b— вектор угла атаки в связанной системе пули, $\omega_{\perp b}$— поперечная угловая скорость, p — скорость собственного вращения пули вокруг продольной оси.

Исходные данные для полной 6DOF-модели

Реальные 6DOF-решатели требуют измеренных или рассчитанных аэродинамических таблиц конкретной пули. Lapua прямо указывает, что её 6DOF-расчёт основан на таблице аэродинамических коэффициентов для каждой пули: коэффициент аэродинамического сопротивления, определённый по доплеровским измерениям; производная коэффициента нормальной силы по углу атаки; производная коэффициента момента тангажа по углу атаки; демпфирование вращения вокруг продольной оси; аэродинамические производные устойчивости; сила Магнуса и момент Магнуса [15, 16].

Таким образом, для точного расчёта ELR-траекторий необходима индивидуальная драг-функция $C_D(M)$, измеренная доплеровским радаром и заданная таблицей Mach–C_D, и точная 6DOF-модель. Однако для наших целей исследования вклада выбранных факторов в суммарное рассеивание облака попаданий достаточно менее точной, но более простой модели.

Модель типа Applied Ballistics / point-mass + G7 BC

В материалах Berger объясняется подход с использованием стандартных моделей сопротивления: при вводе G1/G7 BC стандартная кривая сопротивления масштабируется по заданному BC [6]. Брайан Литц предлагает баллистический калькулятор Applied Ballistics, основанный на point-mass и использовании баллистического коэффициента BC G1/G7 или конкретной функции сопротивления пули. Пуля представляется как материальная точка. Ориентация, прецессия, угол атаки, моментные уравнения, демпфирование вращения вокруг продольной оси и эффект Магнуса напрямую не интегрируются:

$$\dot{\mathrm{r}} = \mathrm{v}$$

$$\dot{\mathrm{v}} = \mathrm{g} - \frac{\rho}{\rho_0}\frac{f_{G7}(V)}{BC_{G7}}\hat{\mathrm{v}}_r$$

где: $\mathrm{v}_r = \mathrm{v} - \mathrm{W}$, $V = \| \mathrm{v}_r \|$, $\hat{\mathrm{v}}_r = \frac{\mathrm{v}_r}{V}$. Здесь $f_{G7}(V)$ — стандартная функция замедления G7. В практических баллистических решателях она обычно задана таблицей или кусочно-степенной аппроксимацией:

$$f_{G7}(V) = A_i V^{n_i}$$

для соответствующего диапазона скоростей. Для современных длинных пуль с хвостовым конусом G7 обычно ближе к реальному сопротивлению, чем G1 [17].

В современных баллистических калькуляторах сопротивление пули может задаваться не одним числом BC_{G1} или BC_{G7}, а собственной функцией сопротивления пули $C_D = C_D(M)$, где C_D — коэффициент лобового сопротивления, M — число Маха. Такая функция обычно задаётся таблицей. Подход Custom Drag Model (CDM) использует сопротивление конкретной пули, измеренное доплеровским радаром, без привязки к стандартным моделям G1/G7. Его преимущества особенно существенны в трансзвуковой и дозвуковой областях [6, 17]. В такой модели BC вообще не используется. Пуля сравнивается не с эталонной G7-пулей, а рассчитывается по собственной аэродинамической кривой. Однако такое использование модели сопротивления значительно усложняет анализ его влияния в зависимости от дальности. Для целей нашего исследования принята модель с баллистическим коэффициентом G7.

Исходные данные для модели point-mass + G7 BC

Примем следующие исходные данные: пуля .338 Berger Tactical / Hybrid OTM, масса пули 300 gr = 19,44 г, диаметр пули 0,869 см = 8,69 мм, длина 4,630 см = 46,30 мм, начальная скорость 920–950 м/с, дистанция обнуления 100 м, высота прицела 5,8 см, дистанция расчета до 2500 м, ветер 0 м/с, температура 15 °C, давление 1013 mbar, влажность 50 %, плотность воздуха 1,2208 кг/м3, отношение к ISA ρ/ρ0 = 0,9966, скорость звука 340,3 м/с, твист 22,86 см = 9”, начальная скорость вращения 249000 об/мин. По странице Berger для 338 Cal 300 Grain Hybrid OTM Tactical указан G7 BC 0,421, хотя у Брайана Литца есть другие значения.

Примем для нашей задачи G7 = 0,421. Для подтверждения работоспособности модели проведем расчет траектории полета пули Berger 338 Cal 300 gr Hybrid OTM Tactical на дистанцию 2000 метров (рис. 1).

На графике видно, что пуля сначала поднимается над линией прицеливания на высоту 16,101 метра примерно через 1200 метров после вылета из ствола, и далее ускоренно снижается, теряя скорость, до попадания в мишень. Скорость пули при этом в силу разного сопротивления падает нелинейно, что определяет и нелинейное время пролета одинаковых промежутков дистанции. В свою очередь, такой режим полета пули создает нелинейность точек вертикального попадания пуль в мишени на разных дистанциях. Однако в абсолютном выражении углы встречи с мишенью малы, что позволяет проекцию облака попаданий в мишень считать без искажения по вертикали.

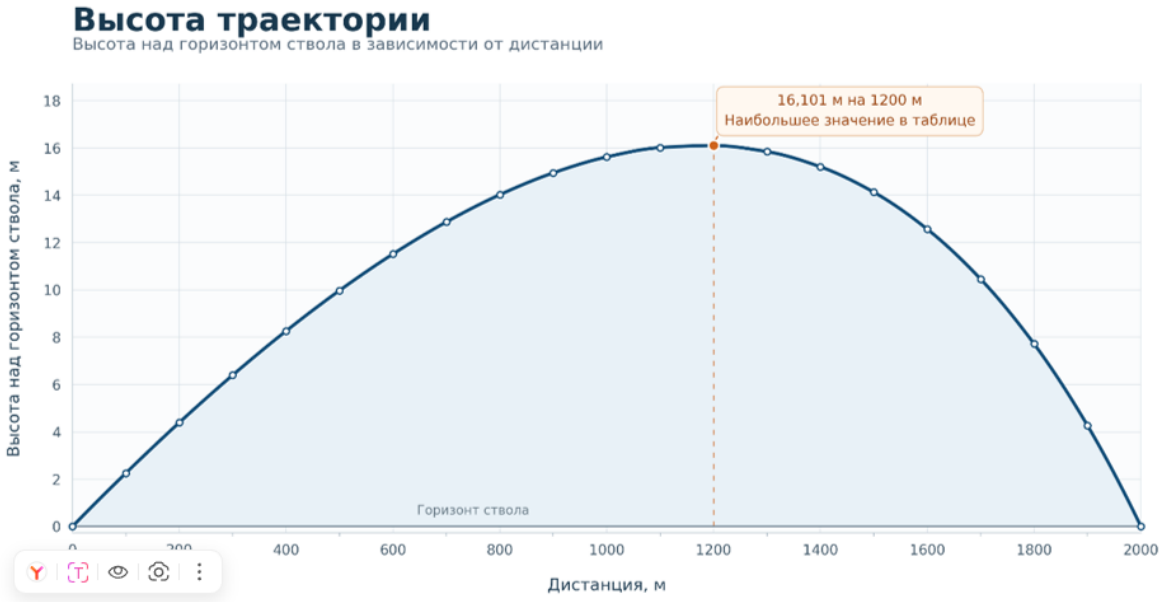


Рисунок 1. Пример расчета траектории полета пули Berger 338 Cal 300 gr Hybrid OTM Tactical на дистанцию 2000 м

Для своей задачи мы применили метод линеаризации и собственные модели внешней баллистики и статистических исследований. Основой примененного подхода стало представление координат точки попадания как функции исходных параметров внешней баллистики:

$$y = f(V_0,\ BC,\ \rho_{air},\ W,\ \alpha,\ L, \ldots)$$

где y — координаты точки попадания, V_0 — начальная скорость пули, BC— баллистический коэффициент, ρ_{air} — плотность воздуха, W— скорость ветра, α — направление ветра, L — дистанция стрельбы. В плоскости мишени, установленной на дальности L, эта зависимость может быть линеаризована: $\Delta y \approx J\Delta p$, где J — матрица чувствительности, а Δp — вектор малых изменений исходных параметров. Для вертикальной поправки это можно записать в развернутом виде:

$$\Delta E \approx \frac{\partial E}{\partial \sigma_{\text{тех}}}\Delta\sigma_{\text{тех}} + \frac{\partial E}{\partial V_0}\Delta V_0 + \frac{\partial E}{\partial BC}\Delta BC + \frac{\partial E}{\partial \rho_{air}}\Delta\rho_{air} + \frac{\partial E}{\partial W}\Delta W + \ldots$$

Такая запись дает не только итоговое облако расчетных попаданий, но и явные коэффициенты чувствительности. Например, можно непосредственно определить, насколько изменится вертикальная поправка при изменении начальной скорости на 1 м/с, баллистического коэффициента на 1%, плотности воздуха, давления, температуры или ветра. Для научного анализа это принципиально важно, поскольку позволяет объяснить результат, а не только получить численное значение вероятности попадания. Дополнительным преимуществом линеаризации является возможность разложить суммарную неопределенность облака попаданий на отдельные составляющие:

$$u_E^2 = (u_{\text{тех}})^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial V_0} u_{V_0}\right)^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial BC} u_{BC}\right)^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial P} u_P\right)^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial T} u_T\right)^2 + \dots$$

В такой форме сразу видно, какой фактор является доминирующим источником ошибки: техническая кучность винтовки, скорость пули, баллистический коэффициент, сила и направление ветра, плотность воздуха, давление, температура, ошибка прицела, ошибка обнуления, округление кликов или другие факторы. Это делает модель удобной не только для расчета, но и для диагностики. Отличие нашего подхода от стандартного метода Монте-Карло состоит не в отказе от вероятностного анализа, который мы сами часто применяем, а в выборе более аналитической и диагностической формы этого анализа, которая позволяет ответить на вопросы, почему разброс именно такой, и какой фактор вносит главный вклад.

Статистическая модель технической кучности винтовки

Модель простая, но дает базовые опорные точки для всех последующих расчетов, поскольку рассматривается предельная кучность, которая могла бы реализоваться, если бы она определялась только начальным направлением разлета пуль (конусом линейного рассеивания). Добавление любых факторов нелинейного влияния на кучность только увеличивает рассеивание облака попаданий. Рассматривается идеализированный случай, когда все источники разброса, кроме разброса направления вылета пули из ствола $\sigma_{\text{тех}}$, отсутствуют: $\sigma_{V0} = 0$, $\sigma_{BC} = 0$, $\sigma_{\text{проч}} = 0$. Тогда кучность на любой дистанции определяется только случайными отклонениями направления вылета пуль из ствола. Это означает, что проекции облака попадания на мишени, расположенные на равных отрезках дистанции, образуют линейный конус разлёта. Пули движутся по криволинейным траекториям (рис. 1), но углы кривизны малы, что позволяет не учитывать угол проекции облака попаданий на мишень и считать, что на всех дистанциях пули заходят в мишени перпендикулярно их плоскости. Пусть угловые отклонения по двум осям независимы и нормально распределены: $\theta_x \sim N\left(0, \sigma_\theta^2\right)$, $\theta_y \sim N\left(0, \sigma_\theta^2\right)$, где σ_θ— техническая угловая кучность в MOA, θ_x, θ_y— угловые отклонения в горизонтальной и вертикальной плоскостях. На дистанции L линейные координаты точки попадания равны $x(L) = L \tan\theta_x$, $y(L) = L \tan\theta_y$. Углы, на которых пуля входит в мишень, достаточно малые, и поэтому можно принять $\tan\theta \approx \theta$, тогда $\sigma_x(L) \approx L\,\sigma_\theta$, $\sigma_y(L) \approx L\,\sigma_\theta$. Если σ_θ задана в MOA, то линейный размер на мишени в сантиметрах равен $S(L, \alpha) = 100\ L\ \tan(\alpha \cdot MOA_{rad})$, где MOA_{rad} = π/180/60. Именно поэтому на графике рис. 2 все линии кучности — прямые, выходящие из начала координат: при постоянной угловой кучности линейный размер группы растёт линейно с дистанцией.

В этой идеализированной модели вероятность попадания в гонг диаметром 1 MOA (размер выделен жирной синей линией) не зависит от дистанции, поскольку мы приняли, что техническая кучность постоянна в MOA, и размер гонга тоже постоянен в MOA. То есть, гонг 1 MOA на 100 м и гонг 1 MOA на 2500 м в угловом смысле одинаковы, поэтому и группа, и гонг масштабируются с расстоянием одинаково.

На рис. 2 слева приведены зависимости линейных размеров групп от дистанции при разной технической кучности винтовки. Синяя жирная линия соответствует размеру гонга в 1 MOA. На рис. 2 справа представлен график вероятности попадания в гонг 1 MOA при разной технической кучности винтовки. Этот простейший случай интересен тем, что лучше, чем эта техническая кучность винтовки $\sigma_{тех}$, у нас уже не будет практически ни на какой дистанции. И если даже с ней вероятность попадания в цель будет невысока, то с добавлением возмущений от других факторов она снизится до значений, когда стрельба по этой цели потеряет смысл из-за низкой вероятности попаданий.

Вероятности попадания в гонг 1 MOA равны: $ES5 = 0.2$ MOA $\rightarrow$ $P \approx 100.0\%$, $ES5 = 0.3$ MOA $\rightarrow$ $P \approx 99.9998\%$, $ES5 = 0.5$ MOA $\rightarrow$ $P \approx 99.09\%$, $ES5 = 0.75$ MOA $\rightarrow$ $P \approx 87.64\%$, $ES5 = 1.0$ MOA $\rightarrow$ $P \approx 69.15\%$, $ES5 = 1.5$ MOA $\rightarrow$ $P \approx 40.71\%$. Эта вероятность рассчитана для идеального совпадения СТП с центром прицеливания. Но даже в этом случае при размере группы 1 MOA каждая третья пуля проходит мимо, а при размере 1,5 MOA почти две из трех, в то время как при размере 0,2 MOA группа из 20 выстрелов попадает в мишень с очень большим запасом.

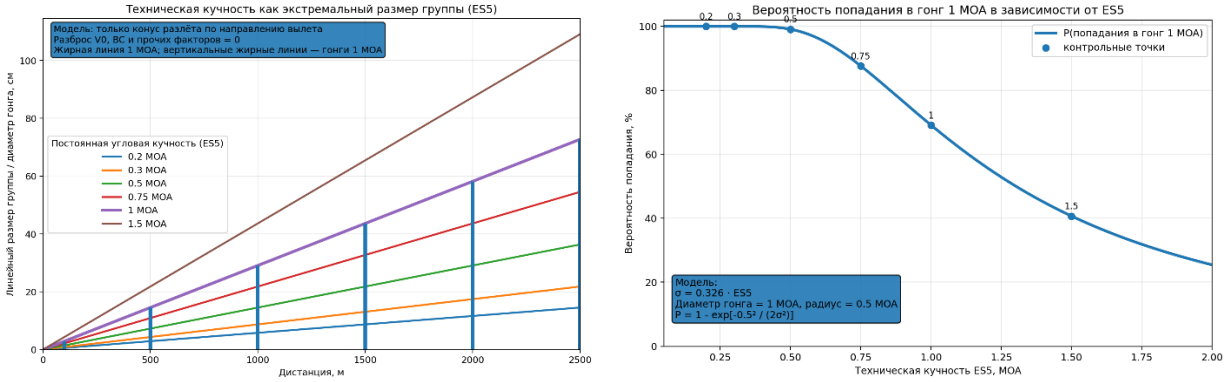


Рисунок 2. Проекции облака попаданий на мишень размером 1 MOA при разной дистанции; вероятность попадания в гонг диаметром 1 MOA в зависимости от кучности винтовки

На рис. 3 изображена сравнительная картина стрельбы по гонгу размером 1 MOA на дистанции 1000 метров при технической кучности винтовки (размере групп) 0,2 MOA и 2 MOA.

Наглядно видно, что при размере группы 0,2 MOA попадание в мишень практически гарантировано, тогда как стрельба с размером группы 2 MOA превращается в лотерею: из 20 выстрелов в мишень попало только 7. Любое отклонение СТП от центра гонга еще больше уменьшает вероятность попадания в него. Любой дополнительный фактор (разброс скорости, баллистического коэффициента, влияние ветра и миража, и т. д.) еще больше уменьшает вероятность попадания в гонг.

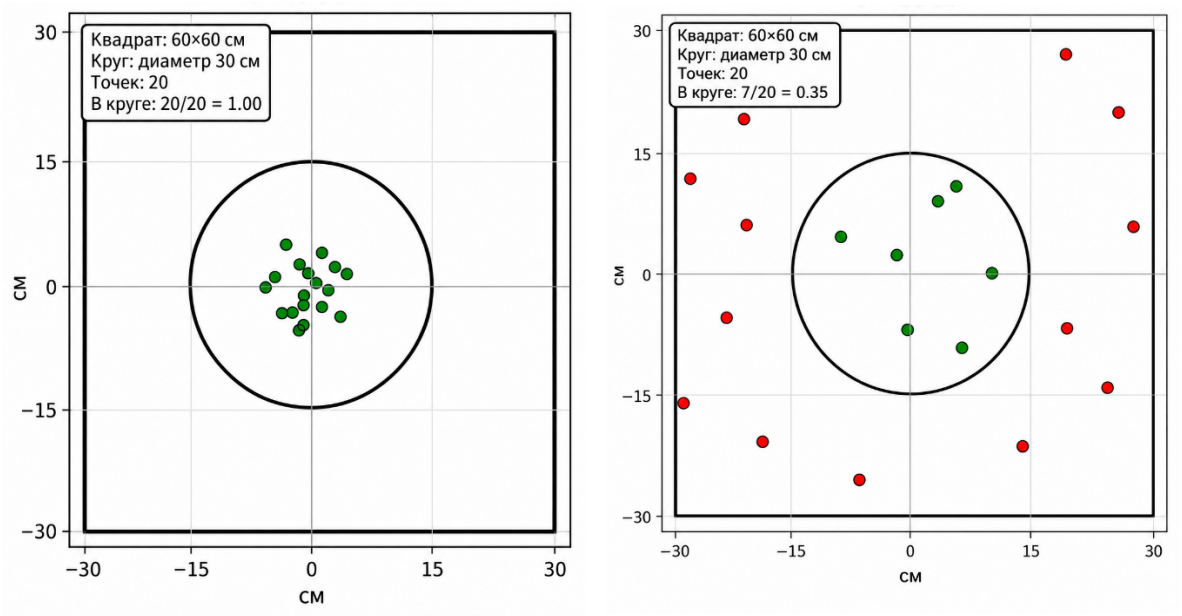


Рисунок 3. Картина на мишени при стрельбе по гонгу размером 1 MOA на дистанции 1000 м при кучности винтовки 0,2 MOA и 2 MOA

Статистическая модель влияния разброса скорости

Перейдем в оценке кучности от экстремального размера группы ES_n к среднему квадратическому отклонению конуса рассеивания $\sigma_{тех}$ и разброса скорости σ_{V0}. Известно соотношение $\sigma = 0{,}326\ ES_5$ [3], где ES_5 - экстремальный размер группы из 5 выстрелов. Пусть средняя начальная скорость будет, например, $\bar{V}_0 = 920$ м/с, а случайное отклонение скорости отдельного выстрела $\delta V_0 = V_0 - \bar{V}_0$, $\delta V_0 \sim N\left(0, \sigma_{V0}^2\right)$, где, например, $\sigma_{V0} = 2$ м/с. Прицел считается обнулённым по средней траектории: $V_0 = \bar{V}_0 = 920$ м/с. То есть пуля со средней скоростью попадает в центр мишени на каждой рассматриваемой дистанции, которую мы введем дискретно как 100, 500, 1000, 1500, 2000, 2500 метров. Общий механизм влияния вариации скорости между выстрелами на вертикальное рассеивание рассмотрен Б. Литцем [17]. Вертикальная ошибка в точке попадания пули от скорости на дистанции L равна:

$$\Delta Z_V\,(L, V_0) = Z\,(L, V_0) - Z\left(L, \bar{V}_0\right)$$

Для малых отклонений скорости эту зависимость можно линеаризовать:

$$\Delta Z_V\,(L, V_0) \approx \frac{\partial Z}{\partial V_0}\delta V_0$$

Тогда среднеквадратическое вертикальное отклонение от разброса скорости:

$$\sigma_{Z,V}(L) = \left|\frac{\partial Z}{\partial V_0}\right| \sigma_{V0}$$

В угловой мере, в MOA:

$$\sigma_{V,\mathrm{MOA}}(L) = \frac{\sigma_{Z,V}(L)}{L\tan(1\ \mathrm{MOA})}$$

Итоговая вертикальная кучность с учётом технической кучности $\sigma_{тех}$ равна:

$$\sigma_{\Sigma}(L) = \sqrt{\sigma_{\text{тех}}^2 + \sigma_{V,\mathrm{MOA}}^2(L)}$$

где $\sigma_{\text{тех}} = 0,1$ MOA —постоянная начальная угловая техническая кучность, а разброс скорости даёт дополнительную зависимую от дальности вертикальную составляющую. Кучность $\sigma_{\text{тех}} = 0,1$ MOA эквивалентна размеру группы из 3 выстрелов ES_3 = 0,24 MOA и из 5 выстрелов ES_5 = 0,31 MOA, что вполне реально для лучших спортивных винтовок крупного калибра. Применение линейного приближения и сложение дисперсий при отсутствии корреляции соответствуют общему статистическому подходу [15].

Почему угловая кучность от разброса скорости меняется с дистанцией

Техническая кучность, связанная с разбросом начального направления пуль (конусом рассеивания), в первом приближении даёт постоянную угловую величину на всех дистанциях: $\sigma_{\text{тех}}(L) = \text{const}$. Если пули вылетели под углом $0,1$ MOA, то считается, что эта угловая ошибка остаётся на 100, 500, 1000, 1500, 2000, 2500 м. Есть, конечно, нюансы, особенно для дальних дистанций, которые мы опустим в данном исследовании. Но разброс скорости работает с ростом дистанции иначе. Он влияет не как начальный угол, а через время полёта и падение. При полете пули в вакууме действуют соотношения:

$$Y \approx \tfrac{1}{2}gt^2, t \approx \tfrac{L}{V_0}, Y \approx \tfrac{1}{2}g\left(\tfrac{L}{V_0}\right)^2.$$

Тогда чувствительность падения траектории к скорости определяется как:

$$\frac{\partial Y}{\partial V_0} \approx -g\frac{L^2}{V_0^3}$$

То есть линейная вертикальная ошибка от разброса скорости растёт примерно, как L^2, а угловая ошибка растёт примерно, как L, потому что реализуется соотношение ΔY/L. В реальной атмосфере сопротивление воздуха усиливает нелинейность, особенно на больших дистанциях и в трансзвуковой области. Поэтому угловой вертикальный вклад разброса скорости возрастает с дистанцией [17].

$$v(x) = V_0 e^{-cx}$$

Тогда гравитационное падение можно записать как:

$$D(L, V_0) = \frac{g}{V_0^2}\left[\frac{e^{2cL} - 1}{(2c)^2} - \frac{L}{2c}\right]$$

Пристрелка по средней скорости означает, что для $\bar{V}_0 = 920$ м/с угол вылета выбран так, чтобы пуля пришла в центр. Для другой скорости вертикальное смещение равно разности падений. Чувствительность к скорости считается центральной разностью:

$$K_V(L) = \frac{1}{L\tan(1\text{MOA})} \left| \frac{D\left(L, \bar{V}_0 + 1\right) - D\left(L, \bar{V}_0 - 1\right)}{2} \right|$$

где $K_V(L)$ имеет размерность MOA на 1 м/с. $\sigma_{V,\text{MOA}}(L) = K_V(L)\sigma_{V0}$ и

$$\sigma_\Sigma(L) = \sqrt{\sigma_{\text{тех}}{}^2 + \sigma^2_{V,\text{MOA}}(L)}$$

Статистическая модель влияния разброса BC

Теперь рассмотрим модель влияния разброса баллистического коэффициента BC при исходных данных $\overline{V}_0 = 920$ м/с, $\bar{BC}_{G7} = 0,421$, $\sigma_{\text{тех}} = 0,1$ MOA, и на тех же дистанциях 100, 500, 1000, 1500, 2000, 2500 метров. Разброс БС примем как $\sigma_{BC} = 0,001$. Баллистический коэффициент BC характеризует, насколько быстро пуля теряет скорость из-за сопротивления воздуха. Если у отдельных пуль в группе или в партии в целом реальный BC немного отличается, то при одинаковой начальной скорости они начинают по-разному тормозиться. Если $BC_i < \bar{BC}$, то пуля имеет большее сопротивление, быстрее теряет скорость, летит дольше и приходит ниже средней траектории. Если $BC_i > \bar{BC}$, то пуля тормозится меньше, летит быстрее и приходит выше средней траектории [17, 7]. Поэтому разброс BC превращается в вертикальный разброс попаданий через цепочку: $\delta BC \Rightarrow \delta C_D \Rightarrow \delta V(x) \Rightarrow \delta TOF \Rightarrow \delta Drop \Rightarrow \delta Z$. На малых дистанциях этот эффект почти не успевает накопиться. Но на больших дистанциях, особенно после 1000–1500 м, даже маленькое отличие BC уже даёт заметную разницу во времени полёта и падении.

Пусть $BC = \bar{BC} + \delta BC$, $\delta BC \sim N\left(0, \sigma^2_{BC}\right)$, где $\bar{BC} = 0,421$, $\sigma_{BC} = 0,001$. Такое консервативно низкое значение σ_{BC} мы взяли не потому, что оно в среднем такое (оно в среднем заметно больше), а потому, что для пули Berger 300 gr о нем нам пока вообще мало что известно, и чтобы брать большее значение σ_{BC}, нужна хорошая доказательная база. Прицел обнулён по средней траектории: $BC = \bar{BC}$. Вертикальное отклонение отдельной пули на дистанции L определяется формулой: $\Delta Z_{BC}(L, BC) = Z(L, BC) - Z\left(L, \bar{BC}\right)$. Для малых отклонений BC аналогично скорости используем линейное приближение:

$$\Delta Z_{BC}(L, BC) \approx \frac{\partial Z}{\partial BC}\delta BC$$

Тогда среднеквадратическое линейное отклонение будет равно:

$$\sigma_{Z,BC}(L) = \left| \frac{\partial Z}{\partial BC} \right| \sigma_{BC}$$

В угловых единицах:

$$\sigma_{BC,\mathrm{MOA}}(L) = \frac{\sigma_{Z,BC}(L)}{L\tan(1\ \mathrm{MOA})}$$

Суммарная вертикальная угловая кучность с учётом технической кучности будет равна:

$$\sigma_{\Sigma}(L) = \sqrt{\sigma_{\text{тех}}^2 + \sigma_{BC,\mathrm{MOA}}^2(L)}$$

Где примем $\sigma_{\text{тех}} = 0,1$ MOA.

Почему угловой разброс от BC меняется с дистанцией. Как и в случае со скоростью, угловая техническая кучность, связанная с разбросом направления вылета, в первом приближении в MOA постоянна: $\sigma_{\text{тех}}(L) = \text{const}$. Пуля, вылетевшая на $0,1$ MOA выше, в принятых приближениях сохранит этот угловой вклад и на 100 м, и на 1000 м. Но BC, как и скорость, влияет иначе. Он меняет всю историю торможения пули. Чем дальше летит пуля, тем больше накапливается разница $\Delta V(x)$, ΔTOF, $\Delta Drop$. Поэтому линейная ошибка падения растёт быстрее, чем просто пропорционально дистанции, и угловая ошибка $\Delta Z/L$ тоже начинает расти с дистанцией. Именно поэтому на 100–500 м разброс BC, как и разброс скорости, практически невидим, а на 1500–2500 м он становится важным фактором вертикального рассеивания. Общая тенденция согласуется с опубликованным анализом влияния вариации BC между выстрелами [17; 7].

Расчётная модель. Для построения зависимости использована гладкая внешнебаллистическая аппроксимация:

$$v(x) = V_0 e^{-c(BC)x}$$

где коэффициент торможения зависит от BC:

$$c(BC) = c_0 \left(\frac{\bar{BC}}{BC} \right)^{\alpha}$$

Модель откалибрована так, чтобы чувствительность к BC совпадала с расчетами по точной модели:

$$D\,(L, V_0, BC) = \frac{g}{V_0^2}\left[\frac{e^{2cL} - 1}{(2c)^2} - \frac{L}{2c}\right]$$

Чувствительность к BC считалась центральной разностью:

$$K_{BC}(L) = \frac{1}{L\tan(1\mathrm{MOA})}\left| \frac{D\,(L, BC + 0,001) - D\,(L, BC - 0,001)}{2} \right|$$

где $K_{BC}(L)$ имеет размерность MOA на $0,001$ BC.

$$\sigma_{BC,\mathrm{MOA}}(L) = K_{BC}(L)\frac{\sigma_{BC}}{0,001}$$

Так как в задаче $\sigma_{BC} = 0,001$, то $\sigma_{BC,\text{MOA}}(L) = K_{BC}(L)$

9. Данные о технической кучности и разбросах скоростей и БК

Техническая кучность в условиях стрельбы с прочного бетонного стола и в закрытом тире у винтовок крупного калибра проверяется редко, поэтому статистики по ней немного. Тем не менее известно, что стабильный Extreme Spread 0,2 MOA из 5 выстрелов для крупного ELR-калибра следует считать исключительно высоким результатом. В этой связи обратим внимание, что по 3 группам из трех выстрелов для винтовки Specter 33XC и по 7 группам для винтовки Monolith 33XC при настройке мы получили средний размер групп 0,173 [1] и 0,187 MOA, то есть меньше, чем 0,2 MOA, а в пересчете на группы из 5 выстрелов 0,22–0,24 MOA. С другой стороны, на соревнованиях встречаются винтовки с технической кучностью хуже 1 MOA. Поэтому диапазон ES_5 = 0,2–1,5 MOA можно считать реалистичным.

Исходя из представленных данных, и с учетом соотношения σ = 0,326 ES_5 рабочим диапазоном технической кучности винтовки крупного калибра для проверки влияния разброса скорости и БС можно принять $\sigma_{\text{тех}} = (0,1 - 0,3)$ MOA, что примерно соответствует экстремальному размеру группы из 5 выстрелов ES_5 = (0,3–1) MOA.

Разброс начальной скорости в одной партии патронов принято задавать как σ_{V0}, то есть как стандартное отклонение начальной скорости в м/с или fps. Второй показатель — ES, extreme spread, то есть разность между самой быстрой и самой медленной пулей в данной серии, $ES = V_{\max} - V_{\min}$ [19]. Без указания числа выстрелов он почти бесполезен, потому что ES растёт с числом выстрелов в группе [2, 3, 20]. Запишем формулы для оценки σ_{V0}. И ES_n. Пусть в серии n выстрелов измерены скорости: $V_1, V_2, \ldots, V_n$. Средняя скорость и ее выборочное стандартное отклонение и размах определяются по известным формулам [3, 19]:

$$\overline{V}_0 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} V_i,\ s_{V0} = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(V_i - \overline{V}_0)^2},\ ES_n = V_{\max} - V_{\min}.$$

Precision Rifle Blog, пересказывая Bryan Litz, приводит пример: если средняя скорость 3000 fps, а SD равен 10 fps, то около 68 % выстрелов будут между 2990 и 3010 fps, а около 95 % — между 2980 и 3020 fps. Для нашей модели $\overline{V}_0 = 920$ м/с, $\sigma_{V0} = 2$ м/с. Тогда 68 % это 918–922 м/с, 95 %–916–924 м/с, 99,7 %–914–926 м/с. В fps 920 м/с ≈ 3018 fps, $\sigma_{V0} = 2$ м/с ≈ 6,6 fps.

ES очень зависит от числа выстрелов, полностью зависит от двух крайних выстрелов и игнорирует все остальные, тогда как SD использует отклонения всех наблюдений [3, 19, 20]. Один и тот же патрон с одной и той же реальной σ даст разные ES в сериях из 5 и 20 выстрелов. С учетом сказанного в нашей работе мы используем записи: $\overline{V}_0 = 920$ м/с, $\sigma_{V0} = 2$ м/с, а не $ES = 5$ м/с.

В пересказе Bryan Litz на Precision Rifle Blog приведены ориентиры SD 20, 15, 10 fps и ниже [23]. Можно предложить условную шкалу: плохая стабильность, массовый заводской уровень — 6,1 м/с; лучше среднего заводского, но не уровень хорошего патрона — 4,6 м/с; цель большинства опытных релоадеров — меньше 3,0 м/с. Очень хороший уровень, сильный

результат — 1,5–2,4 м/с; труднодостижимый и требующий строгой методики, исключительный уровень — 0,9–1,5 м/с. Пример SD около 3 fps в сериях из 10 выстрелов приведён автором блога C. Zant как его личное наблюдение [23].

Для релоадера самая большая статистическая ловушка — делать выводы по 3–5 выстрелам. Если вы отстреляли 5 выстрелов и получили $SD = 2$ м/с, это не значит, что вся партия имеет $\sigma = 2$ м/с. При оценке стандартного отклонения из малой выборки возникает значительная статистическая неопределённость; малые выборки могут существенно искажать SD и ES, и поэтому вывод о параметре генеральной совокупности следует сопровождать доверительным интервалом [3, 21, 22].

Физическая цепочка влияния скорости на точку попадания такая: $\delta V_0 \Rightarrow \delta TOF \Rightarrow \delta Drop \Rightarrow \delta Z$. Более медленная пуля летит дольше и падает ниже. Более быстрая — летит меньше времени и приходит выше [17]. Berger в статье о SD и «bell curve» также приводит пример значительной разницы падения на 1500 ярдах; в опубликованном примере сравниваются скорости 2980 и 3020 fps, то есть разность составляет 40 fps [8]. В анализе PRB по матчу PRS пример с 6.5 Creedmoor на 1033 ярда показал, что SD 20 fps давал около 70 % вероятности попадания в модельных условиях, а SD 5 fps — около 87 %; при этом автор подчёркивает, что другие факторы, включая ветер, дальность и механическую кучность, тоже входят в общую неопределённость [24].

В научном исследовании целесообразно использовать несколько сценариев разброса скорости, например, исключительно высокий уровень σ_{V0} = 1 м/с, очень хороший ERL/F-class уровень 1,5 м/с, реалистичный для точного релоадинга уровень 2 м/с, хороший практический уровень 3 м/с, средний 5 м/с, слабый для ERL выше 6 м/с. Можно также оперировать обобщенными и относительными величинами, уменьшая число переменных в формуле суммарного разброса кучности. Но у каждого исследования есть цель, и для нашего мы остановились на двух значениях разброса скорости – 1 м/с и 2 м/с.

По разбросу BC гораздо меньше объем достоверных данных. Одна и та же фраза «разброс BC 1 %» может означать разные вещи, например σ_{BC} = 1 % от среднего BC или ES = 1% от среднего BC или BC лежит в пределах $\pm 1\%$. Это три разные величины. В статье Bryan Litz, перепечатанной Shooting Sports USA, используется термин SD of BC, то есть стандартное отклонение баллистического коэффициента. Там сказано, что Doppler radar позволяет измерить BC каждого отдельного выстрела и определить SD of BC. В той же статье приведена важная шкала: очень качественные пули могут иметь BC SD около 0,4–0,6 %, типичные — около 0,8–1,2 %, а отдельные проблемные пули — 1,5–2,0 % и более. Там же пример: измеренное $SD_{BC} = 0,00111$ при среднем BC 0,368 интерпретируется как 0,3 %. Это однозначно показывает, что проценты считаются как $\sigma_{BC}/\bar{BC} \cdot 100\%$, то есть это относительное СКО, а не размах и не ± [17]. Berger рассматривает геометрическую неоднородность и нарушения устойчивости как разные причины вариации BC между выстрелами [9]. Для Long Range Hybrid Target с Meplat Reduction Technology измерялись BC SD порядка 0,5 % и 0,3 %, а у некоторых длинных тяжёлых пуль других производителей встречались BC SD 2–3 % и более. В статье Berger Shot-to-Shot Consistency приведён пример большого разброса: средний G7 BC, определённый на интервале от 0 до 1700 ярдов, около 0,290; в серии из 10 выстрелов максимум 0,301, минимум 0,283; SD равен 0,006, а ES — 0,018 [7]. Относительно среднего 0,290 это 2,1 % BC SD, а полный размах 6,2 %. В той же

статье приведён хороший пример: Berger 6.5 mm 140 gr Hybrid Target со средним BC 0,316, ES 0,006 и SD 0,002. Это 0,63 % SD и 1,9 % ES. Эти примеры хорошо показывают, что SD = 0,5 % от номинала – это уже близко к предельному значению, и также показывают, почему нельзя смешивать SD и ES: в одном и том же наборе данных ES в несколько раз больше SD. Отметим, что данные о других моделях пуль не должны автоматически распространяться на Berger 300 gr Hybrid OTM Tactical.

Все это означает, что если в материалах Bryan Litz / Applied Ballistics / Berger встречается фраза вроде “BC SD = 1 %”, то это, как правило, $\sigma_{BC}/BC \cdot 100\% = 1\%$. То есть это относительное стандартное отклонение BC, а не «плюс-минус 1 %» и не полный размах от минимального до максимального BC. Поэтому для оценки разброса BC между выстрелами удобнее опираться на данные Applied Ballistics/Berger, где прямо используется понятие SD_{BC} [17; 7].

Форумные обсуждения BC полезны как практический фон, но редко дают строгую величину σ_{BC}. Обычно там смешиваются четыре разных вопроса: отличие заявленного BC от реального; отличие среднего BC одной партии от другой партии; изменение BC с дальностью или скоростью; разброс BC от пули к пуле внутри одной партии. Чаще всего встречаются обсуждения геометрии пуль. Это полезно для оценки геометрической стабильности, но это не прямое измерение BC SD. Связь есть: разница в геометрии влияет на разницу в сопротивлении [9; 11], но перевести «тысячные дюйма по оживалу» в σ_{BC} без независимых аэробаллистических измерений нельзя. Возможности измерения BC по скорости, времени полёта и доплеровским данным рассмотрены в [12].

Для нашей модели с $BC_{G7} = 0,421$ можно было бы использовать такую шкалу, которая согласуется с формулировками Shooting Sports USA / Bryan Litz и Berger: 0,4–0,6 % — очень качественные пули с подрезанным (выровненным) и ужатым носиком (меплатом); 0,5–1 % - высококачественные матчевые пули из коробки; 0,8–1,2 % — типично хорошие пули; 1,5–2,0 % — проблемные, как правило, длинные, чрезмерно высокий разброс; 2–3 % - очень некачественные пули. Berger также говорит о стандарте SD ниже 1 % и о случаях 0,5 % и 0,3 %.

Для нашей пули $\bar{BC}_{G7} = 0,421,$ и если $CV_{BC} = 1\%$, то $\sigma_{BC} = 0,421 \cdot 0,01 = 0,00421$. Это в 4 раза больше взятого σ_{BC} в наших расчетах. Если считать распределение примерно нормальным, то около 68 % пуль будут находиться в пределах $\bar{BC} \pm 1\sigma,$ то есть $0,421 \pm 0,0042$. Около 95 % пуль будут в пределах примерно $\bar{BC} \pm 2\sigma$ то есть $0,421 \pm 0,0084$. Если брать модель для хороших матчевых пуль, нужно считать несколько сценариев: $\sigma_{BC} = 0,001$ — уникальный очень оптимистичный случай с сортировкой и доработкой пуль, около 0,24 % SD; $\sigma_{BC} = 0,002$ — реалистично очень хороший случай, около 0,48 % SD; σ_{BC} = 0,004–0,008 — около 2 % SD, проблемный случай для ELR. Для пули $BC_{G7} = 0,421$ в основной модели будем использовать σ_{BC} = 0,001 как предельный случай, $\sigma_{BC} = 0,002$ как разумный рабочий вариант для очень качественных матчевых пуль, а $\sigma_{BC} = 0,0042$ как сценарий «1 % BC SD», то есть более распространенный среди спортсменов случай.

Исходя из проведенного анализа, $\sigma_{BC} = 0,001$ при $BC = 0,421$ соответствует исключительно малому относительному BC SD = 0,237 %. Это очень оптимистичный уникальный разброс, значительно лучше, чем многие приведённые публичные примеры [17; 7]. Но у нас пока нет надежных данных о разбросе пули Berger 300 gr Hybrid OTM (Tactical)

из коробки, и тем более нет данных, какой разброс мы получим после сортировки пуль, подрезки и ужатия носика, поэтому исследуем влияние разброса BC при предельно высоком значении $\sigma_{BC} = 0,001$, но также проведем расчеты и при значении $\sigma_{BC} = 0,0025$ и $0,00421$ [21; 20].

Результаты и обсуждение

Влияние разброса скорости и BC на кучность

Результаты расчета влияния разброса начальной скорости на суммарную угловую кучность приведены на рис. 2а, а на линейный размер облака попаданий на рис. 2б. Исходные данные для расчета: V_0 = 920 м/с, σ_{V0} = 2 м/с, $\sigma_{тех}$ = 0,1 и 0,2 MOA. Техническая кучность винтовки в MOA в нашей модели вносит постоянный вклад в суммарную кучность, потому что она задаётся угловым конусом вылета пуль. Но ошибка от разброса скорости не является постоянной угловой величиной. Она накапливается через время полёта и гравитационное падение. Поэтому на малых дистанциях 100–500 м разброс скорости почти не снижает угловую кучность. На 1000 м разброс скорости уже становится сопоставимым с технической кучностью, а на 1500–2500 м становится одним из главных факторов вертикального рассеивания.

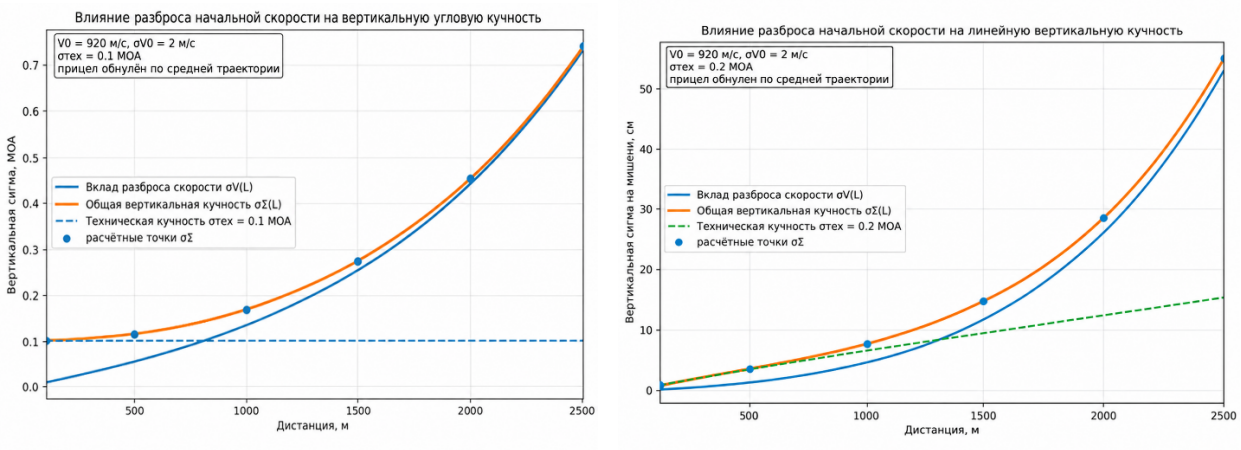


Рисунок 4. Зависимость кучности в MOA и в см от дистанции

На 2000 м даже при отличной технической кучности $0,1$ MOA разброс скорости 2 м/с увеличивает вертикальную сигму до $\sigma_\Sigma(2000) \approx 0,452$ MOA.

На 2500 м модель дает уже $\sigma_\Sigma(2500) \approx 0,740$ MOA, увеличение размера облака попаданий в 7 раз.

На правом графике рис. 4 принят угловой размер технической кучности $\sigma_{тех}$ = 0,2 MOA, в два раза больше, чем на левом графике, поэтому вклад разброса скорости незаметен до 1000–1200 м, после чего линейный размер облака попаданий на мишени начинает быстро увеличиваться, и при начальном размере σ_Σ = 0,58 см σ_Σ увеличивается до 55,3 см на дистанции в 2500 м, то есть, почти в 100 раз. При этом размер облака попаданий только от технической кучности составил 14,54 см, линейно увеличившись со 100 до 2500 м в 25 раз.

Результаты расчета влияния ВС на суммарную угловую кучность приведены на рис. 3а, а на линейный размер облака попаданий в σ на рис. 3б. Исходные данные для расчета: V_0 = 920 м/с, σ_{V0} = 2 м/с, $\sigma_{тех}$ = 0,1 и 0,2 МОА, σ_{BC} = 0,001. На 100 м влияние разброса BC почти также, как и скорости - практически равно нулю: $\sigma_{BC}(100) \approx 0,00014$ МОА, и общая кучность равна технической: $\sigma_{\Sigma}(100) \approx 0,1$ МОА. Нелинейное влияние ВС на суммарную кучность начинается позже, чем у скорости, но темпы роста влияния с дистанцией по сравнению со скоростью выше. На 1500 м вклад становится сопоставимым с технической кучностью: $\sigma_{BC}(1500) \approx 0,079$ МОА. На 2000 м разброс $BC = 0,001$ уже доминирует над технической кучностью: $\sigma_{BC}(2000) \approx 0,198$ МОА, $\sigma_{\Sigma}(2000) \approx 0,221$ МОА. На 2500 м модель даёт уже очень сильный рост: $\sigma_{BC}(2500) \approx 0,443$ МОА, $\sigma_{\Sigma}(2500) \approx 0,454$ МОА.

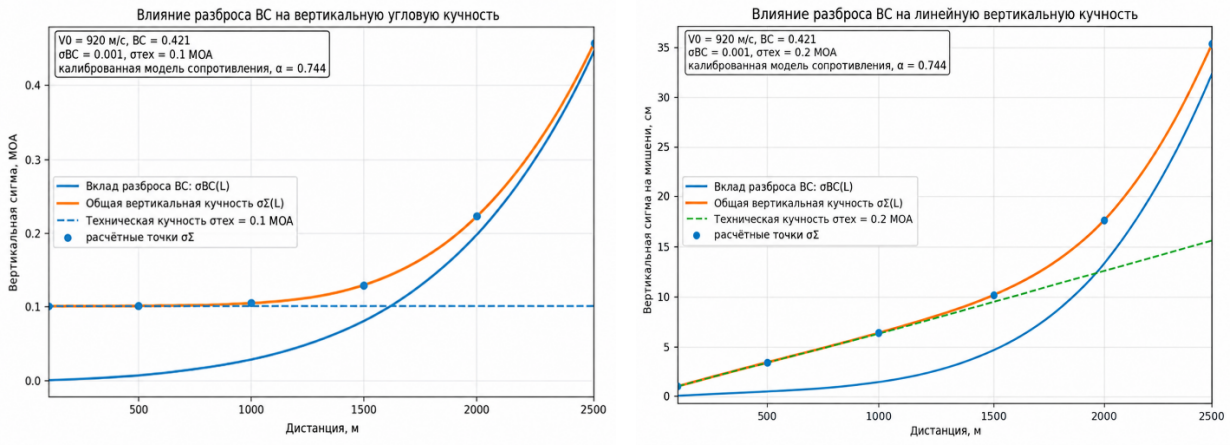


Рисунок 5. Зависимость кучности в МОА и в см от дистанции

Если представить те же результаты в сантиметрах (рис. 5 справа), то на дистанциях 100, 500, 1000, 1500, 2000, 2500 метров вертикальное среднее квадратическое отклонение точки попадания $Б_{\sum}$ равно 0,29, 1,46, 3, 5,55, 12,88, 33,05 см. Линейный размер облака попаданий на дистанциях 100 и 2500 м различается в 114 раз. Если взять классический интервал $3Б\sum$, то отклонения точек попадания на дистанции 2000 м с вероятностью примерно 99,73 % будет по 39 см в обе стороны от точки прицеливания, а на дистанции 2500 м уже по 100 см в обе стороны от точки прицеливания. Таких больших отклонений стрелки часто не видят только потому, что количество выстрелов у них как правило ограничено. Если стрелять много, такие разбросы проявятся.

Совместная модель влияния разброса начальной скорости и БК на суммарную кучность в зависимости от дистанции имеет вид:

$$\sigma_{\Sigma}(L) = \sqrt{\sigma_{\text{тех}}^2 + \sigma_V^2(L) + \sigma_{BC}^2(L)}$$

где $\sigma_{\text{тех}} = 0,1$ МОА, $\sigma_V(L) = K_V(L)\sigma_{V0}$, $\sigma_{BC}(L) = K_{BC}(L)\frac{\sigma_{BC,\text{исх}}}{0,001}$. Исходные данные: $\overline{V}_0 = 920$ м/с, $\sigma_{V0} = 2$ м/с, $\bar{BC}_{G7} = 0,421$, $\sigma_{BC,\text{исх}} = 0,001$.

Графики совместного влияния скорости и ВС для угловой и линейной кучности приведены на рис. 4. На 500 м разброс скорости уже даёт заметную, но еще небольшую добавку: $\sigma_{\Sigma}(500) \approx 0,113$ МОА. На 1000 м скорость становится главным фактором вертикали: $\sigma_{\Sigma}(1000) \approx 0,168$ МОА. На 2000 м суммарная вертикальная сигма возрастает почти до

$0,5$ MOA. При этом вклад BC уже превышает вклад технической кучности: $\sigma_V(2000) = 0,441$ MOA, $\sigma_{BC}(2000) = 0,198$ MOA. На 2500 м модель показывает резкий рост: $\sigma_\Sigma(2500) \approx 0,863$ MOA.

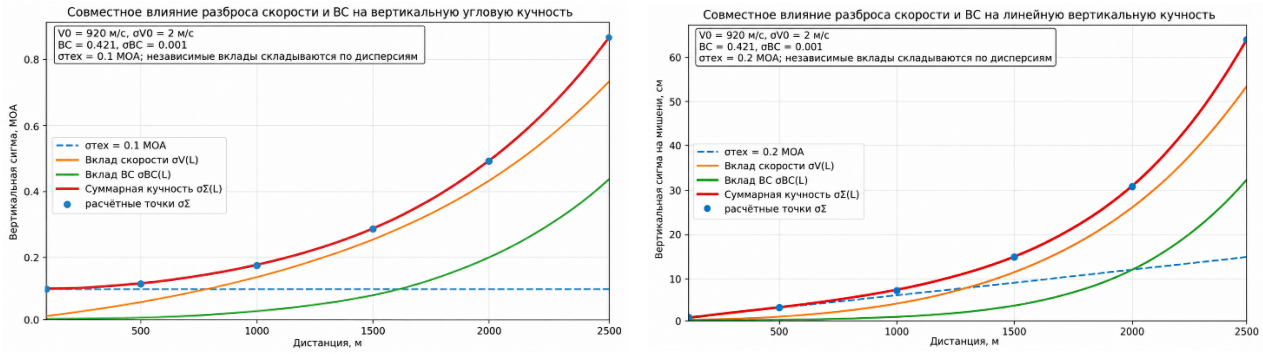


Рисунок 6. Зависимость суммарной кучности в MOA от дистанции

На рис. 6б приведены зависимости размеров облака попаданий в см при действии сразу двух факторов. Видно, что линейный размер облака рассеивания при действии всех трех факторов, выраженный в σ_Σ, вырос до 65 см, то есть, увеличился в 112 раз. То есть, с вероятностью 95 % интервал суммарного разброса может составить более 250 см.

Мы брали в расчетах в основном техническую кучность 0,1 MOA, среднее квадратическое отклонение скорости 2 м/с и предельно низкий разброс BC 0,001. При изменении этих данных соответственно будет меняться доля кучности, зависящая от дистанции, вклад каждой составляющей и предельная дистанция, на которой влияние разброса скорости или BC становится критичным. Чем меньше разброс BC, тем больше вклад разброса скорости. Однако даже при предельно низком разбросе BC его вклад, начиная от 1000–1500 метров, составляет значительную часть от суммарной кучности. Поэтому мы провели еще расчеты для другого крайнего, но реалистичного значения разброса BC. При средней скорости V0 = 920 м/с, разбросе скорости σ_{V0} = 1 м/с и 2 м/с, технической кучности $\sigma_{тех}$ = 0,1 MOA, среднем значении BC = 0,421 мы взяли разброс σ_{BC} = 0,00421, или 1 % от среднего значения. Результаты расчетов представлены на рис. 5. На графиках видно, что в этом примере разброс BC начал доминировать намного раньше. При переходе от $\sigma_{BC} = 0,001$ к $\sigma_{BC} = 0,00421$ вклад разброса BC резко возрастает и уже на дистанциях больше 1200 м становится доминирующим. Снижение разброса скорости с 2 до 1 м/с помогает немного снизить общий разброс, но при таком большом σ_{BC} главный рост вертикальной кучности уже определяется именно BC.

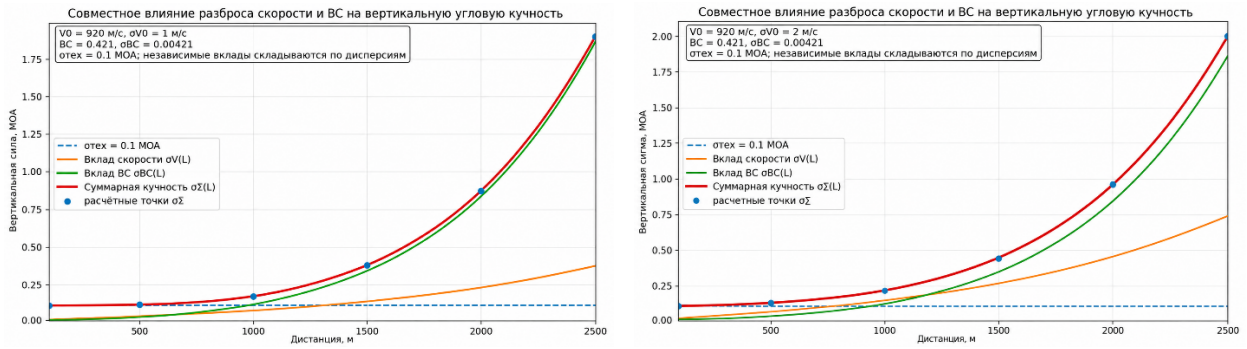


Рисунок 7. Зависимость суммарной кучности в MOA от дистанции

Также было проверено влияние увеличения разброса скорости до 3 м/с и 5 м/с (рис. 7). До 500 м влияние ещё умеренное. На 750 метрах влияние уже значительное, а на 1000 м суммарная сигма уже в 2,5 раза больше технической. На 2000 м она становится более 1 MOA. В этом сценарии на средних дальностях основной рост создаёт скорость, но к 2000–2500 м вклад BC становится сопоставимым и затем доминирует. При $\sigma_{V0} = 5$ м/с скорость становится очень сильным источником вертикали уже с 600 м. На 1500 м общая угловая кучность превышает техническую более чем в 7 раз, а на 2000 м — почти в 14 раз.

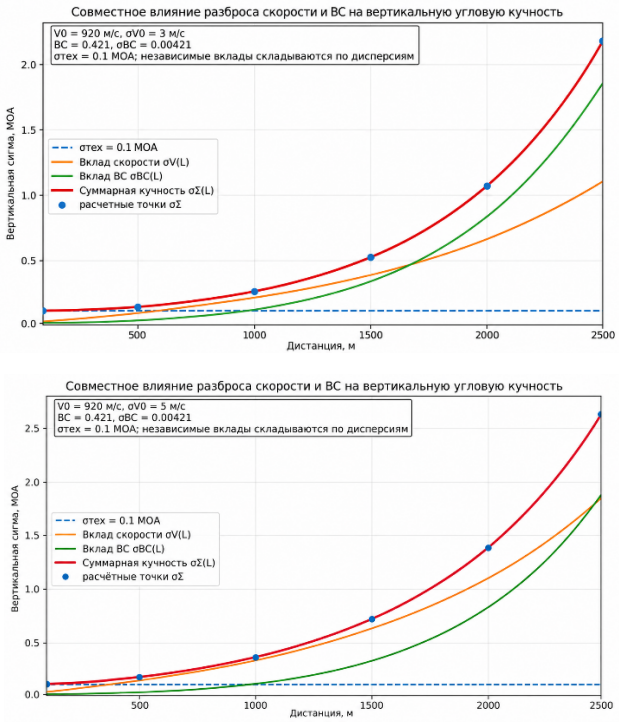


Рисунок 8. Зависимость суммарной кучности в MOA от дистанции

Кривая технической кучности $\sigma_{\text{тех}} = 0,1$ MOA остаётся горизонтальной линией. Кривая скорости $\sigma_V(L)$ растёт быстрее в диапазоне 500-1500 м, но потом уступает влиянию BC. Кривая BC $\sigma_{BC}(L)$ на малых дистанциях почти прижата к нулю, но затем резко поднимается, потому что различие в сопротивлении накапливается по мере полёта.

При большом $\sigma_{BC} = 0,00421$ и малом разбросе скорости BC начинает доминировать и давать сильную вертикаль. При $\sigma_{V0} = 3$ м/с на 2500 м вклад BC уже больше вклада скорости. При $\sigma_{V0} = 5$ м/с на 2500 м вклад скорости и BC становятся почти равными.

Практический вывод. Если техническая кучность винтовки $\sigma_{\text{тех}} = 0,1$ MOA, то суммарная кучность остается относительно неизменной только на дистанциях до 500 метров и только при очень малых разбросах скорости. При $\sigma_{V0} = 3$–5 м/с и $\sigma_{BC} = 0,00421$ на дистанциях 1500–2500 м вертикальная кучность уже почти целиком определяется не технической кучностью винтовки, а качеством патрона и пули. $\sigma_{V0} = 3$ м/с уже заметно ухудшает вертикаль после 1000 м, а $\sigma_{V0} = 5$ м/с становится недопустимо большим для точной ELR стрельбы. Для дистанций 1500–2500 м такая комбинация даёт уже не «тонкую поправку», а кратное увеличение вертикального размера группы.

Сравним теперь влияние разброса скорости и BC при высокой $\sigma_{\text{тех}} = 0.07$ MOA и низкой технической кучности $\sigma_{\text{тех}}$ = 0,5 MOA (рис.7, табл.1).

Из графика и таблицы хорошо видно, что при сверхвысокой технической кучности $\sigma_{\text{тех}} = 0.07$ MOA абсолютный суммарный на этом уровне до 500 м, а дальше он нелинейно растет.

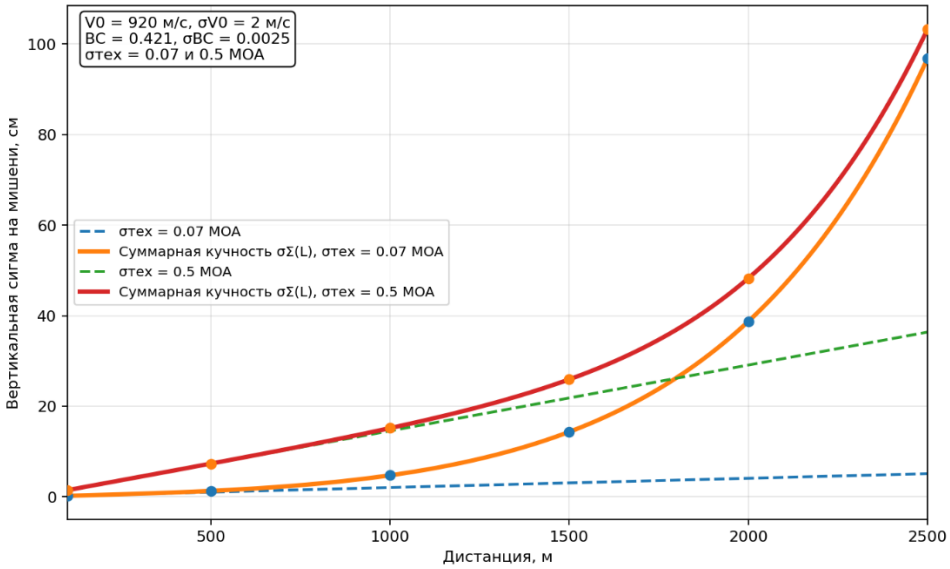


Рисунок 9. Зависимость суммарной кучности в см от дистанции при высокой и низкой технической кучности

Таблица 1. Сравнительная таблица технической и суммарной кучности

Сравнительная таблица технической и суммарной кучности

Дистанция, м	σтех, см при 0,07 MOA	σΣ, см при 0,07 MOA	σтех, см при 0,5 MOA	σΣ, см при 0,5 MOA
100	0,20	0,21	1,45	1,45
500	1,02	1,29	7,27	7,31
1000	2,04	4,73	14,54	15,16
1500	3,05	14,33	21,82	25,92
2000	4,07	38,73	29,09	48,27
2500	5,09	96,81	36,36	103,29

При $\sigma_{тех} = 0.5$ MOA на дистанциях до 1000 м наблюдаемая угловая кучность определяется в основном технической кучностью системы. Поэтому разница между винтовкой с $\sigma_{тех} = 0.07$ MOA и винтовкой с $\sigma_{тех} = 0.5$ MOA проявляется очень резко. Предельная дистанция, на которой баллистические факторы в относительном влиянии начинают доминировать и преимущества высокой технической кучности значительно утрачиваются, для $\sigma_{тех} = 0.07$ MOA начинается примерно с 1000 м, а при 2100 м доля вклада $\sigma_{тех}$ в суммарную кучность уже не превышает 10 %.

На дистанции 2500 м вклад $\sigma_{тех}$ в $\sigma_{\sum}$ составляет около 5 %. При $\sigma_{тех}$ = 0.5 MOA на ближних и средних дистанциях техническая кучность сама по себе уже велика, поэтому вклад скорости и BC менее заметен, а выигрыш к суммарной кучности велик. На дистанции до 1500 м преимущество высокой технической кучности неоспоримо. Однако к 2000–2500 м суммарная кучность в обоих случаях начинает доминировать над технической, и различие между двумя системами уменьшается. Например: на 1000 м 0.07 MOA 4.73 см, 0.5 MOA 15.16 см; на 2500 м 0.07 MOA 96.81 см, 0.5 MOA 103.29 см. То есть на очень больших дистанциях преимущество сверхмалой технической кучности заметно уменьшается, поскольку основную роль начинают играть разброс скорости и разброс BC. Это, конечно, не говорит о том, что при стрельбе на сверхдальние дистанции высокая техническая кучность не нужна. Стрелок с винтовкой лучшей кучности имеет преимущества на всех дистанциях, а на дистанциях до 1000–1500 м преимущество сверхвысокой технической кучности проявляется очень убедительно, и сохраняется дальше, если одновременно обеспечены малые σ_{V0} и σ_{BC}. Но с ростом дистанции вклад разброса начальной скорости и баллистического коэффициента нелинейно растёт. Чем выше кучность, тем меньше дистанция, на которой влияние разброса скорости и BC становится доминирующим.

Мы провели анализ зависимости кучности от дистанции по вертикали. А если речь о полной группе по мишени, то главный дополнительный фактор — это, конечно, случайный профиль бокового ветра по траектории. Анализу влияния случайного профиля ветра по

траектории мы посвятим следующее наше исследование. Пока примем одинаковый разброс по вертикали и горизонтали и представим, какой может быть реалистичный вид мишеней на различных дистанциях. На рис. 10 представлено 6 мишеней, точки попадания на которых рассчитаны с одинаковыми условиями: среднее значение V0 = 920 м/с, разброс скорости σ_{V0} = 2 м/с, среднее значения BC = 0,421, разброс σ_{BC} = 0,0025, техническая кучность $\sigma_{хтех} = \sigma_{утех}$ = 0,1 MOA (ES_5 = 0,3 MOA). Угловой размер облака попаданий на этих мишенях при одной и той же технической кучности винтовки растет, и на дистанциях 100, 500, 1000, 1500, 2000, 2500 м σ_{Σ} = 0,1, 0,114, 0,177, 0,336, 0,669, 1,333 MOA. Если перевести кучность в более привычный стрелкам размер групп, то на дистанции 100 м размер групп ES_5 = 0,3 MOA, а на дистанции 2500 м мы получили размер групп уже ES_5 = 4 MOA, или почти в 14 раз хуже технической кучности.

Угловой размер мишеней. Нужно обратить внимание, что на мишенях рис. 8 принят именно угловой размер в MOA. То есть, все мишени имеют одинаковый размер в MOA, а их реальный линейный размер на местности с ростом дистанции увеличивается пропорционально дистанции. В последнем варианте для дистанции 2500 м было принято поле мишени 5 x 5 MOA, то есть от -2.5 MOA до $+2.5$ MOA по горизонтали и вертикали.

Если все мишени сделать одинакового физического размера, например, 2x2 м, тогда визуальное сравнение будет уже другим: физически одинаковая мишень на дальних дистанциях займет всё меньший угловой размер. Как известно, линейный размер 1 MOA на дистанции L равен 1 MOA = 2,9089 · L/100 м. Тогда 1 MOA на дистанциях 100, 500, 1000, 1500, 2000, 2500 м равен 2,91, 14,54, 29,09, 43,63, 58,18, 72,72 см. Поэтому линейные размеры мишеней на этих дистанциях равны 5 x 5 MOA или соответственно 14.54 × 14.54, 72.72 × 72.72, 1.45 × 1.45, 2.18 × 2.18, 2.91 × 2.91, 3.64 × 3.64 см. То есть, на 100 м поле мишени вместе с подложкой получилось около 14.5 см, а на 2500 м — уже около 3.64 м.

Концентрические круги через 0,5 MOA означают, что радиусы кругов идут с шагом 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5 MOA. Например, центральный круг радиусом 0.5 MOA имеет диаметр 1 MOA. На 2500 м $1\ \text{MOA} = 72.72$ см, поэтому диаметр круга 1 MOA на такой дистанции 72.72 см, а всё поле 5 MOA3.64 м.

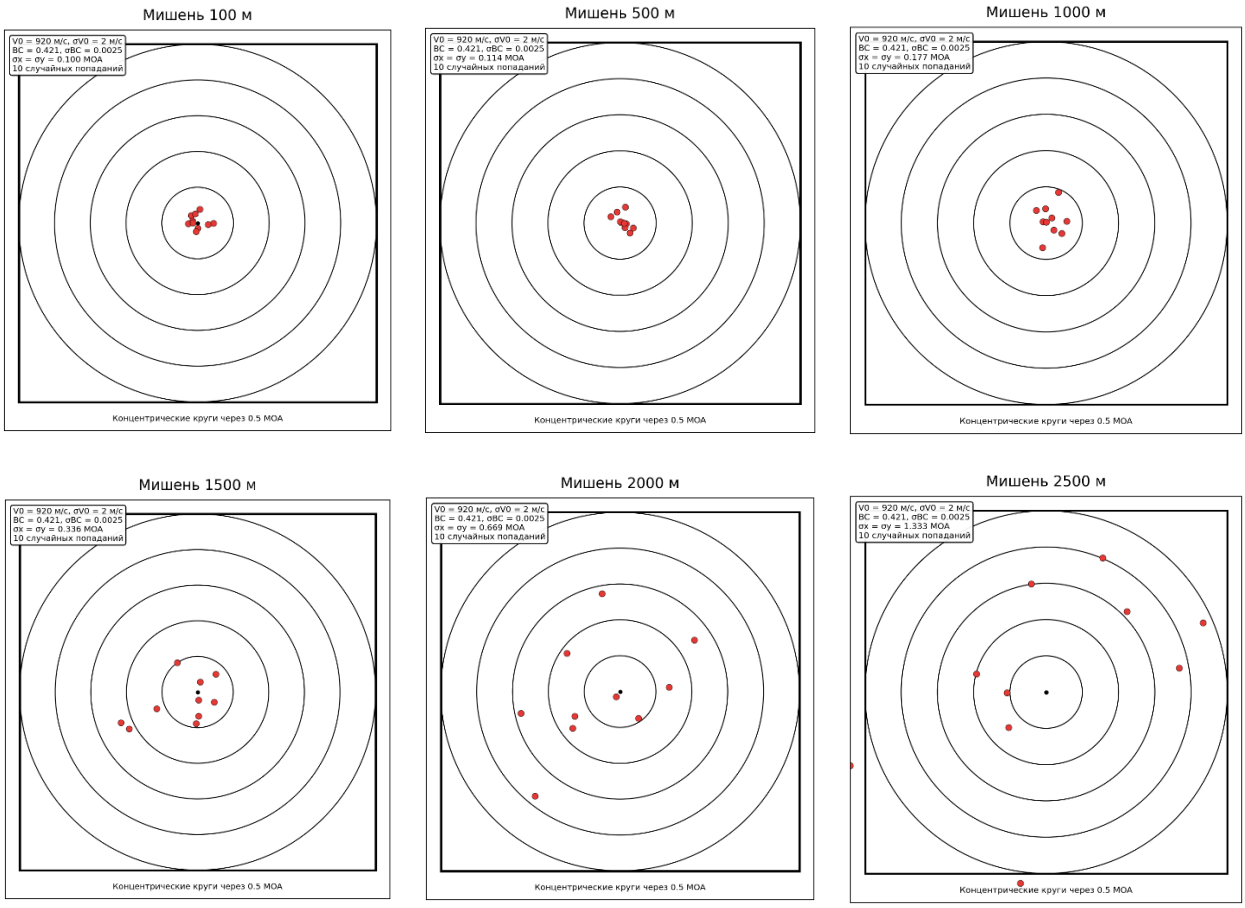


Рисунок 10. Имитация точек попаданий в мишень с одинаковым угловым размером при стрельбе на разные дистанции группами по 10 выстрелов

Для шести мишеней рис. 10 рассчитаем вероятность попадания в центральный круг диаметром $D = 1$ MOA. Радиус круга $R = 0,5$ MOA. На мишенях было принято двумерное нормальное распределение с одинаковыми отклонениями по горизонтали и вертикали: $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_\Sigma(L)$. Из табл. 2 следует, что до 1000 м вероятность попадания в центральный круг диаметром 1 MOA остаётся очень высокой. После 1500 м вероятность резко падает. На 2000 м она равна 24%, а на 2500 м всего 6,8. То есть, по принятой модели при $V_0 = 920$ м/с, $\sigma_{V0} = 2$ м/с, $BC = 0,421$, $\sigma_{BC} = 0,0025$, $\sigma_{\text{тех}} = 0,1$ MOA центральный круг 1 MOA уверенно поражается до 1000 м, но на 1500–2500 м вероятность быстро падает из-за снижения суммарной угловой кучности от разброса скорости и BC.

При несовпадении СТП с центром мишени или влиянии ветра и миража вероятность попасть в круг диаметром 1 MOA на дистанции 2500 м при использованных данных мала. Это можно понимать так, что пуля 300 gr с BC = 0,421, и соответственно, калибр 33XC могут уверенно поражать мишени до дистанций 1500 – 2000 м, но являются недостаточными для надежного поражения мишеней на дистанциях выше 2000 м.

Таблица 2. Расчет вероятности попадания в центральный круг 1 MOA

Дистанция, м	σΣ, MOA	Вероятность попадания	Вероятность, %	Ожидаемо попаданий из 10
100	0,100	0,999996	**99,9996%**	10,00
500	0,114	0,999936	**99,9936%**	10,00
1000	0,177	0,981129	**98,11%**	9,81
1500	0,336	0,669596	**66,96%**	6,70
2000	0,669	0,243376	**24,34%**	2,43
2500	1,333	0,067938	**6,79%**	0,68

Проведенные исследования показывают, что обеспечение прежде всего экстремальной технической кучности $Б_{тех} \leq 0{,}1$ MOA ($ES_5 \leq 0{,}25$ MOA), и затем минимального разброса скорости и BC $Б_{V0} \leq 1$ м/с и $Б_{BC} \leq 0{,}3–0{,}5$ % от номинала являются целевыми задачами спортсмена, рассчитывающего на победу в высокоранговых соревнованиях ERL. Мишени на 2000 и 2500 м показывают, что 1500–2000 м – это уже предел эффективного применения пули Berger 300 gr и винтовки в калибре 33XC. Эти дистанции требуют применения винтовок больших калибров с более тяжелыми пулями с более высоким BC.

Заключение

В статье исследуется влияние технической кучности спортивной винтовки калибра 33XC, разброса начальной скорости и баллистического коэффициента (BC) пули Berger .338 300 gr на суммарную угловую кучность в диапазоне дистанций 100–2500 м. В представленных расчётных сценариях показано, что на дистанциях до 1000–1500 м винтовка 33XC, настроенная на более высокую техническую кучность, обладает очевидным преимуществом. Во всем диапазоне исследованных дистанций стрелок с максимальной кучностью винтовки также получает преимущество перед другими. Однако по мере увеличения дальности возрастает вклад в угловое рассеивание разброса скорости и BC, а вклад технической кучности снижается.

Основной результат исследования состоит в выявлении предельной дистанции применения винтовки данного калибра и пули в 1500–2000 м, при которой вклад технической кучности в суммарную кучность еще высок, и вклад зависящих от дальности параметров пули еще не привел к неприемлемо большому рассеиванию облака пропаданий. Также не только выявлено, что для стрельбы на дальние дистанции одинаково важным является настройка винтовки на экстремальную кучность, обеспечение минимального разброса скорости и BC, но и получены целевые значения этих параметров.

Дальнейшая проверка выводов предполагает сопоставление расчётов с результатами натурных испытаний и отдельный анализ случайного ветрового воздействия.

Список литературы

1. Богословский В.Н., Жуков И.Г. Новый проект спортивной винтовки в калибре 33XC // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. – 2026. – Ч. 7, № 7 (148). – С. 4–21. – DOI: 10.32743/UniTech.2026.148.7.23194. URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23194 (дата обращения: 29.09.2026).
2. Богословский В.Н., Кадомкин В.В., Жуков И.Г. Показатели кучности спортивной и охотничьей винтовки. Аналитический обзор // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. – 2024. – Ч. 3, № 4 (121). – С. 29–44. – DOI: 10.32743/UniTech.2024.121.4.17376. URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/17376 (дата обращения: 29.09.2026).
3. Богословский В.Н. Оценка кучности спортивной винтовки по экстремальному размеру группы // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. – 2026. – Ч. 1, № 8 (149). – С. 4–30. – DOI: 10.32743/UniTech.2026.149.8.23285. URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23285 (дата обращения: 29.09.2026).
4. Berger Bullets. 338 Caliber 300 Grain Hybrid OTM Tactical Rifle Bullet [Электронный ресурс]. – [Б. г.]. URL: https://bergerbullets.com/product/338-caliber-300-grain-hybrid-otm-tactical/ (дата обращения: 29.09.2026).
5. Berger Bullets. BC Effect on Precision [Электронный ресурс]. // No BS BC. URL: https://bergerbullets.com/nobsbc/bc-effect-on-precision/ (дата обращения: 29.09.2026).
6. Berger Bullets. Custom Drag Models for Extreme Long Range [Электронный ресурс]. // No BS BC. URL: https://bergerbullets.com/nobsbc/custom-drag-models-for-extreme-long-range/ (дата обращения: 29.09.2026).
7. Berger Bullets. Shot-to-Shot Consistency [Электронный ресурс]. // No BS BC. URL: https://bergerbullets.com/nobsbc/shot-to-shot-consistency/ (дата обращения: 29.09.2026).
8. Berger Bullets. Standard Deviation of BC – The Bell Curve [Электронный ресурс]. // No BS BC. URL: https://bergerbullets.com/nobsbc/standard-deviation-of-bc-the-bell-curve/ (дата обращения: 29.09.2026).
9. Berger Bullets. Sources of BC Inconsistency [Электронный ресурс]. // No BS BC. URL: https://bergerbullets.com/nobsbc/sources-of-bc-inconsistency/ (дата обращения: 29.09.2026).
10. Berger Bullets. BC Consistency [Электронный ресурс]. // No BS BC. URL: https://bergerbullets.com/nobsbc/bc-consistency/ (дата обращения: 29.09.2026).
11. Berger Bullets. Manufacturing Effects on BC [Электронный ресурс]. // No BS BC. URL: https://bergerbullets.com/nobsbc/manufacturing-effects-on-bc/ (дата обращения: 29.09.2026).
12. Berger Bullets. Measuring BCs [Электронный ресурс]. // No BS BC. URL: https://bergerbullets.com/nobsbc/measuring-bcs/ (дата обращения: 29.09.2026).
13. CSA Tir Canjuers. 2026 KO2M/KO1M Rules and Procedures [Электронный ресурс]. URL: https://www.csatircanjuers.fr/en/general-rules/ (дата обращения: 29.09.2026).
14. Hornady Manufacturing. 338 Cal.338 300 gr A-Tip Match [Электронный ресурс]. – [Б. г.]. URL: https://www.hornady.com/bullets/rifle/338-cal-.338-300-gr-a-tip-match (дата обращения: 29.09.2026).

15. Lapua. Lapua Ballistics tips: The benefits of 6DOF [Электронный ресурс]. – 30.09. – 2020. URL: https://www.lapua.com/lapua-ballistics-tips-benefits-of-6dof/ (дата обращения: 29.09.2026).
16. Lapua. Lapua Ballistics App [Электронный ресурс]. – [Б. г.]. URL: https://www.lapua.com/support/lapua-ballistics-app-2/ (дата обращения: 29.09.2026).
17. Litz B. Shot-to-Shot Variation in Muzzle Velocity and Ballistic Coefficient [Электронный ресурс] / B. Litz. // Shooting Sports USA. – 2020. URL: https://www.ssusa.org/content/shot-to-shot-variation-in-muzzle-velocity-and-ballistic-coefficient/ (дата обращения: 29.09.2026).
18. National Institute of Standards and Technology. Combining uncertainty components [Электронный ресурс]. // NIST Reference on Constants, Units, and Uncertainty. URL: https://physics.nist.gov/cuu/Uncertainty/combination.html (дата обращения: 29.09.2026).
19. NIST/SEMATECH. Measures of Scale [Электронный ресурс]. // e-Handbook of Statistical Methods. URL: https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/eda356.htm (дата обращения: 29.09.2026).
20. NIST/SEMATECH. Shewhart X-bar and R and S Control Charts [Электронный ресурс]. // e-Handbook of Statistical Methods. URL: https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/pmc/section3/pmc321.htm (дата обращения: 29.09.2026).
21. NIST/SEMATECH. Normal Distribution [Электронный ресурс]. // e-Handbook of Statistical Methods. URL: https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/eda3661.htm (дата обращения: 29.09.2026).
22. NIST/SEMATECH. Chi-Square Test for the Variance [Электронный ресурс]. // e-Handbook of Statistical Methods. URL: https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/eda358.htm (дата обращения: 29.09.2026).
23. Zant C. How Much Does SD Matter? [Электронный ресурс] / C. Zant. // Precision Rifle Blog. – 2015. URL: https://precisionrifleblog.com/2015/04/18/how-much-does-sd-matter/ (дата обращения: 29.09.2026).

References

1. Bogoslovskii V.N., Zhukov I.G. Novyj proekt sportivnoj vintovki v kalibre 33KhS [New project of a sporting rifle in caliber 33XC]. Universum: Technical Sciences, part 7. Available at: [Электронный ресурс]. – 2026. – No. 7 (148). – P. 4–21. – DOI: 10.32743/UniTech.2026.148.7.23194. – URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23194 (accessed: 29.09.2026). (In Russ.).
2. Bogoslovskii V.N., Kadomkin V.V., Zhukov I.G. Pokazateli kuchnosti sportivnoj i okhotnich'ej vintovki. Analiticheskij obzor [Accuracy indicators of sports and hunting rifles. Analytical review]. Universum: Technical Sciences, part 3. Available at: [Электронный ресурс]. – 2024. – No. 4 (121). – P. 29–44. – DOI: 10.32743/UniTech.2024.121.4.17376. – URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/17376 (accessed: 29.09.2026). (In Russ.).

3. Bogoslovskii V.N. Otsenka kuchnosti sportivnoj vintovki po ekstremal'nomu razmeru gruppy [Assessment of competition rifle precision using shot-group extreme spread]. Universum: Technical Sciences, part 1. Available at: [Электронный ресурс]. – 2026. – No. 8 (149). – P. 4–30. – DOI: 10.32743/UniTech.2026.149.8.23285. – URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23285 (accessed: 29.09.2026). (In Russ.).
4. Berger Bullets. 338 Caliber 300 Grain Hybrid OTM Tactical Rifle Bullet. No date. Available at: [Электронный ресурс]. – URL: https://bergerbullets.com/product/338-caliber-300-grain-hybrid-otm-tactical/ (accessed: 29.09.2026).
5. Berger Bullets. BC Effect on Precision. No BS BC. No date. Available at: [Электронный ресурс]. – URL: https://bergerbullets.com/nobsbc/bc-effect-on-precision/ (accessed: 29.09.2026).
6. Berger Bullets. Custom Drag Models for Extreme Long Range. No BS BC. No date. Available at: [Электронный ресурс]. – URL: https://bergerbullets.com/nobsbc/custom-drag-models-for-extreme-long-range/ (accessed: 29.09.2026).
7. Berger Bullets. Shot-to-Shot Consistency. No BS BC. No date. Available at: [Электронный ресурс]. – URL: https://bergerbullets.com/nobsbc/shot-to-shot-consistency/ (accessed: 29.09.2026).
8. Berger Bullets. Standard Deviation of BC – The Bell Curve. No BS BC. No date. Available at: [Электронный ресурс]. – URL: https://bergerbullets.com/nobsbc/standard-deviation-of-bc-the-bell-curve/ (accessed: 29.09.2026).
9. Berger Bullets. Sources of BC Inconsistency. No BS BC. No date. Available at: [Электронный ресурс]. – URL: https://bergerbullets.com/nobsbc/sources-of-bc-inconsistency/ (accessed: 29.09.2026).
10. Berger Bullets. BC Consistency. No BS BC. No date. Available at: [Электронный ресурс]. – URL: https://bergerbullets.com/nobsbc/bc-consistency/ (accessed: 29.09.2026).
11. Berger Bullets. Manufacturing Effects on BC. No BS BC. No date. Available at: [Электронный ресурс]. – URL: https://bergerbullets.com/nobsbc/manufacturing-effects-on-bc/ (accessed: 29.09.2026).
12. Berger Bullets. Measuring BCs. No BS BC. No date. Available at: [Электронный ресурс]. – URL: https://bergerbullets.com/nobsbc/measuring-bcs/ (accessed: 29.09.2026).
13. CSA Tir Canjuers. 2026 KO2M/KO1M Rules and Procedures. 2026. Available at: [Электронный ресурс]. – URL: https://www.csatircanjuers.fr/en/general-rules/ (accessed: 29.09.2026).
14. Hornady Manufacturing. 338 Cal.338 300 gr A-Tip Match. No date. Available at: [Электронный ресурс]. – URL: https://www.hornady.com/bullets/rifle/338-cal-.338-300-gr-a-tip-match (accessed: 29.09.2026).
15. Lapua. Lapua Ballistics tips: The benefits of 6DOF. September 30, 2020. Available at: [Электронный ресурс]. – URL: https://www.lapua.com/lapua-ballistics-tips-benefits-of-6dof/ (accessed: 29.09.2026).

16. Lapua. Lapua Ballistics App. No date. Available at: [Электронный ресурс]. – URL: https://www.lapua.com/support/lapua-ballistics-app-2/ (accessed: 29.09.2026).
17. Litz B. Shot-to-Shot Variation in Muzzle Velocity and Ballistic Coefficient. Shooting Sports USA, 2020. Available at: [Электронный ресурс]. – URL: https://www.ssusa.org/content/shot-to-shot-variation-in-muzzle-velocity-and-ballistic-coefficient/ (accessed: 29.09.2026).
18. National Institute of Standards and Technology. Combining uncertainty components. NIST Reference on Constants, Units, and Uncertainty. No date. Available at: [Электронный ресурс]. – URL: https://physics.nist.gov/cuu/Uncertainty/combination.html (accessed: 29.09.2026).
19. NIST/SEMATECH. Measures of Scale. e-Handbook of Statistical Methods. No date. Available at: [Электронный ресурс]. – URL: https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/eda356.htm (accessed: 29.09.2026).
20. NIST/SEMATECH. Shewhart X-bar and R and S Control Charts. e-Handbook of Statistical Methods. No date. Available at: [Электронный ресурс]. – URL: https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/pmc/section3/pmc321.htm (accessed: 29.09.2026).
21. NIST/SEMATECH. Normal Distribution. e-Handbook of Statistical Methods. No date. Available at: [Электронный ресурс]. – URL: https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/eda3661.htm (accessed: 29.09.2026).
22. NIST/SEMATECH. Chi-Square Test for the Variance. e-Handbook of Statistical Methods. No date. Available at: [Электронный ресурс]. – URL: https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/eda358.htm (accessed: 29.09.2026).
23. Zant C. How Much Does SD Matter? Precision Rifle Blog, 2015. Available at: [Электронный ресурс]. – URL: https://precisionrifleblog.com/2015/04/18/how-much-does-sd-matter/ (accessed: 29.09.2026).

ТЕКСТИЛЬНАЯ И ЛЁГКАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

Статья поступила в редакцию: 04.09.2026
Статья принята к публикации: 15.09.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 677.05

Механизмы ложного кручения в кольцевом прядении: анализ конструкций, принципов действия и перспектив развития

Махкамова Шоира Фахритдиновна
PhD, доц.
Ташкентский институт текстильной и лёгкой промышленности
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: shoira-0218@mail.ru

Муминова Шахзода Нигматжон кизи
базовый докторант
Ташкентский институт текстильной и лёгкой промышленности
Республика Узбекистан, г. Ташкент Республика Узбекистан, г. Ташкент

False-twist devices in ring spinning: analysis of designs, operating principles, and development prospects

Makhkamova Shoira
PhD
Tashkent Institute of Textile and Light Industry
Uzbekistan, Tashkent

Muminova Shakhzoda
Doctoral student
Tashkent Institute of Textile and Light Industry
Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

В статье рассмотрены теоретические основы и современные конструктивные решения для реализации ложного кручения в технологии кольцевого прядения. Проанализировано влияние ложного кручения на формирование прядильного треугольника, степень вовлечения периферийных волокон в структуру пряжи, ворсистость и остаточный крутильный момент. На основе анализа патентных и научных источников систематизирована эволюция устройств ложного кручения: от точечных механических и пневматических механизмов кручения до вращающихся и протяжённых ременных систем двойного ложного кручения. Проведено сравнительное рассмотрение принципов действия, особенностей контакта с волокнистым

Библиографическое описание: Махкамова Ш.Ф., Муминова Ш.Н. кизи Механизмы ложного кручения в кольцевом прядении: анализ конструкций, принципов действия и перспектив развития // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23406

продуктом, возможностей регулирования параметров процесса и перспектив промышленного применения различных конструкций. Показано, что развитие устройств ложного кручения направлено на повышение эффективности передачи крутильного воздействия, стабилизацию процесса формирования пряжи и расширение диапазона технологически допустимой крутки. Отдельно рассмотрена возможность применения таких устройств при переработке прядомых волокнистых отходов. Установлено, что опубликованные исследования преимущественно относятся к кондиционному волокнистому сырью, поэтому эффективность существующих конструкций при переработке вторичного сырья требует самостоятельной экспериментальной оценки. Определены перспективные направления дальнейшего развития, связанные с автоматизацией контроля, адаптивным регулированием параметров ложной крутки и интеграцией устройств в современные прядильные системы.

Abstract

The article considers the theoretical principles and modern design solutions for implementing false twisting in ring spinning technology. The influence of false twist on the formation of the spinning triangle, the involvement of peripheral fibers in the yarn structure, yarn hairiness, and residual yarn torque is analyzed. Based on patent and scientific sources, the evolution of false-twist devices is systematized, from point-contact mechanical and pneumatic twisters to rotary and extended-contact double-belt false-twisting systems. The operating principles, interaction with the fiber strand, possibilities for controlling process parameters, and prospects for industrial application of different designs are comparatively analyzed. It is shown that the development of false-twist devices is aimed at improving the efficiency of twist transmission, stabilizing yarn formation, and extending the technologically feasible range of yarn twist. The possible application of such devices to spinnable fibrous waste is considered separately. Published studies are shown to focus mainly on conventional spinning raw materials; therefore, the efficiency of existing designs when processing secondary fibrous raw materials requires separate experimental evaluation. Promising directions for further development include automated control, adaptive regulation of false-twist parameters, and integration of the devices into modern spinning systems.

Ключевые слова: кольцевое прядение, ложное кручение, механизм ложного кручения, треугольник кручения, остаточный крутильный момент, ворсистость пряжи, фрикционный механизм ложного кручения, ременный механизм ложного кручения.

Keywords: ring spinning, false twist, false-twist device, spinning triangle, residual yarn torque, yarn hairiness, friction false-twister, belt false-twister.

Введение

Кольцевое прядение сохраняет важное значение в производстве пряжи благодаря универсальности технологического процесса и возможности получения продукции с высокими физико-механическими характеристиками [9, с. 168-170; 8, с. 248-249]. Несмотря на развитие пневмомеханического, аэродинамического и других способов прядения, кольцевой способ широко используется для производства пряжи различного волокнистого состава и линейной плотности.

Одним из ключевых факторов, ограничивающих стабильность формирования пряжи при кольцевом прядении, является наличие треугольника кручения – участка между линией зажима передней вытяжной пары и зоной окончательного формирования пряжи, в котором происходит перераспределение и объединение волокон под действием крутильного поля. Периферийные волокна в этой зоне вовлекаются в формируемую структуру менее эффективно, что может способствовать увеличению ворсистости и снижению эффективности использования волокон [3, 4, 10, 11].

Другой важной характеристикой является остаточный крутильный момент одиночной пряжи. Его наличие связано с неравновесным распределением крутильных деформаций в волокнах и может проявляться в виде склонности пряжи к раскручиванию и образованию спиральности трикотажного полотна. Снижение остаточного крутильного момента особенно важно для производства трикотажных изделий, поскольку спиральность отрицательно влияет на внешний вид, стабильность формы и эксплуатационные характеристики изделий [10, 3]. Современные исследования совершенствования кольцевого прядения также рассматривают ложное кручение как один из способов повышения стабильности процесса и улучшения качества пряжи [2].

В Республике Узбекистан исследование влияния механизма ложного кручения на процесс формирования кольцевой пряжи показало возможность улучшения условий распространения крутки в зону формирования пряжи, повышения разрывной нагрузки и снижения неровноты и обрывности [1].

В связи с этим разработка и совершенствование устройств ложного кручения представляет научный и практический интерес. Несмотря на значительное количество конструктивных решений, систематизированное сопоставление принципов их действия и последовательности конструктивного развития применительно к кольцевому прядению представлено недостаточно.

Целью исследования является систематизация теоретических представлений о ложном кручении и сравнительный анализ конструкций механизмов ложного кручения, применяемых и предлагаемых для совершенствования технологии кольцевого прядения, с определением основных направлений их дальнейшего развития и перспектив применения данных механизмов при переработке волокнистых отходов в прядильном производстве.

Материалы и методы

В качестве материалов исследования использованы научные публикации по технологии кольцевого прядения, теории формирования и распространения крутки, а также патентные документы, описывающие конструктивные решения механизмов ложного кручения. Теоретическую основу анализа составили положения технологии прядения штапельного волокна [7, с.56-57] и исследования механизмов формирования и изменения крутки в модифицированных кольцепрядильных системах [12, 16, 18].

При проведении сравнительного анализа конструкции классифицировались по следующим признакам: способ передачи крутильного воздействия; характер контакта рабочего органа с волокнистым продуктом; наличие одной или нескольких зон воздействия;

возможность регулирования величины ложной крутки; влияние на натяжение волокнистого продукта; влияние на структуру пряжи и технологическую стабильность; конструктивная сложность и эксплуатационные особенности.

Результаты и обсуждение

Теоретические основы ложного кручения. Ложное кручение представляет собой временное крутильное воздействие на волокнистый продукт, при котором на ограниченном участке формируется дополнительная крутка, компенсируемая после прохождения продукта через зону воздействия. В классической схеме продукт зажимается в двух точках, а крутильное воздействие прикладывается между ними. В результате по обе стороны точки приложения формируются участки с противоположными направлениями крутки. При непрерывном перемещении продукта через устройство введённая крутка передаётся вдоль волокнистого продукта и за пределами устройства компенсируется [7, с.56].

В кольцевом прядении принцип ложного кручения используется в модифицированном виде. Механизм ложного кручения устанавливается, как правило, между линией зажима передней пары вытяжного прибора и направляющим элементом или зоной формирования пряжи [12, с. 29-31]. В зависимости от конструкции дополнительная крутка может вводиться механическим, фрикционным или пневматическим способом. При этом направление ложной крутки выбирается с учётом направления и величины результирующей крутки пряжи [8, с. 13-15; 9, с. 66-68].

Следует различать ложное кручение как физическое явление и механизм ложного кручения как техническое средство его реализации. Ложная крутка может возникать и без специального устройства в различных технологических зонах прядильных машин вследствие относительного вращательного движения волокнистого продукта. Однако использование специального механизма ложного кручения позволяет изменять величину и распределение крутильного воздействия.

Основной технологический эффект ложного кручения в кольцевом прядении заключается в предварительном уплотнении волокнистого пучка перед формированием окончательной структуры пряжи. Сужение треугольника кручения способствует повышению степени вовлечения периферийных волокон в формируемую структуру. Исследования малокручёной кольцевой пряжи показывают, что применение механизма ложного кручения может изменять распределение волокон в поперечном сечении и повышать прочность пряжи при сниженной величине постоянной крутки [12, с.112-114].

Для систем, предусматривающих предварительное разделение волокнистого продукта на отдельные субпучки, возможно дополнительное управление остаточным крутильным моментом. В общем случае условие баланса может быть представлено выражением:

$$\Sigma M_i - M = 0, \quad (i = 1 \ldots N), \tag{1}$$

где M_i – остаточный крутильный момент i-го субпучка;

M – результирующий остаточный крутильный момент сформированной одиночной пряжи; N – количество субпучков.

Таким образом, применение ложного кручения может обеспечивать следующие технологические эффекты: уменьшение ширины треугольника кручения; повышение степени вовлечения периферийных волокон в структуру пряжи; уменьшение количества свободных концов волокон; снижение ворсистости; возможность устойчивого формирования пряжи при пониженной постоянной крутке; снижение остаточного крутильного момента; повышение стабильности последующей переработки пряжи.

Влияние ложного кручения на структуру и свойства пряжи. При традиционном кольцевом прядении периферийные волокна в треугольнике кручения подвергаются крутильному воздействию в условиях, отличающихся от условий для волокон, расположенных ближе к центральной части волокнистого пучка. Это может приводить к неполному вовлечению части волокон в формируемую структуру и увеличению количества выступающих концов волокон.

Предварительное ложное кручение изменяет геометрию и напряжённое состояние волокнистого пучка перед зоной окончательного кручения. В результате уменьшается поперечный размер треугольника кручения и изменяется траектория движения периферийных волокон.

Экспериментальные исследования модифицированной кольцевой системы показали, что изменение параметров ложного кручения оказывает влияние на стабильность процесса и свойства получаемой пряжи [18]. При этом существенное значение имеют не только величина ложной крутки, но и характеристики поверхности крутильного элемента механизма ложного кручения, включая материал, шероховатость, твёрдость и диаметр фрикционной поверхности [19].

В исследованиях, посвящённых модифицированной малокручёной пряже, применение ложного кручения обеспечивало повышение прочности при сниженной постоянной крутке за счёт изменения распределения и взаимодействия волокон в треугольнике кручения [12, с. 29-31]. Полученная пряжа характеризовалась иной структурой по сравнению с обычной кольцевой пряжей.

Снижение остаточного крутильного момента имеет особое значение при производстве трикотажных полотен. Исследования модифицированной кольцевой пряжи показывают, что снижение остаточного момента может сопровождаться уменьшением спиральности полотна и улучшением его эксплуатационных характеристик [16].

Анализ и развитие конструкций механизмов ложного кручения. Эволюция устройств ложного кручения в кольцевом прядении связана с переходом от простых контактных элементов к конструкциям, обеспечивающим более эффективное и управляемое воздействие на волокнистый продукт. Основными направлениями их совершенствования стали снижение остаточного крутильного момента, повышение эффективности передачи крутильного воздействия, увеличение зоны взаимодействия с волокнистым продуктом и возможность регулирования параметров дополнительного кручения.

Одним из направлений совершенствования технологии стало разделение волокнистого продукта на несколько потоков с последующим их объединением. Такой принцип позволяет воздействовать на отдельные субпучки посредством индивидуального ложного кручения и за счёт их последующего объединения регулировать результирующий крутильный момент. Данный подход получил развитие в способе и устройстве для производства одиночной

кольцевой пряжи с минимальным остаточным крутильным моментом, защищённом патентом
US 6 860 095 B2 [13]. Перед треугольником кручения волокнистый продукт разделяется на два или более субпучка, каждый из которых подвергается индивидуальному ложному кручению, после чего субпучки объединяются в процессе формирования пряжи.

В патенте предусмотрены различные варианты устройств для введения ложной крутки, включая механический фрикционный, желобчатый и пневматический крутители. Остаточный крутильный момент сформированной пряжи определяется взаимодействием моментов отдельных субпучков. Преимуществом такого решения является возможность регулирования остаточного крутильного момента одиночной пряжи без обязательного выполнения отдельной операции сложения. Однако конструкция ориентирована на переработку подготовленного прядильного сырья, тогда как вопросы её эффективности при использовании прядомых волокнистых отходов в рассмотренном техническом решении не исследованы. Предварительное разделение волокнистого продукта и необходимость согласования параметров отдельных потоков также могут усложнять адаптацию устройства к сырью с повышенной неоднородностью.

Следующим направлением развития стало применение вращающихся механизмов ложного кручения, обеспечивающих непосредственное введение дополнительной крутки в волокнистый продукт. Один из вариантов такого устройства описан в патенте US 7 096 655 B2 [14]. Ложная крутка в данной конструкции создаётся вращающейся головкой, установленной в технологической зоне кольцепрядильной машины. Существенное значение имеет соотношение частот вращения механизма ложного кручения и веретена, изменение которого позволяет регулировать величину дополнительной крутки и связанный с ней остаточный крутильный момент.

Применение вращающегося рабочего органа расширяет возможности управления процессом, однако конструкция также разрабатывалась применительно к традиционному прядильному сырью. Данных об эффективности её применения при переработке прядомых волокнистых отходов и смесей с высоким содержанием вторичного сырья не представлено. Кроме того, наличие высокоскоростных вращающихся элементов предъявляет повышенные требования к динамической балансировке, точности монтажа и техническому обслуживанию, что может иметь дополнительное значение при переработке неоднородного волокнистого сырья.

Другим направлением совершенствования рабочих органов является применение вращающихся профилированных поверхностей. В таких конструкциях геометрия рабочего элемента и его вращение используются для периодического изменения характера силового взаимодействия с волокнистым пучком, что обеспечивает формирование дополнительной крутки [17]. Несмотря на развитие данного направления, исследования эффективности таких конструкций применительно к прядомым волокнистым отходам также ограничены.

Одним из решений, направленных на увеличение зоны взаимодействия, является двухременная система двойного ложного кручения, описанная в патенте US 2010/0024376 A1 [15]. В отличие от устройств с локальным контактом, в данной конструкции используется

протяжённое фрикционное взаимодействие волокнистого продукта с двумя движущимися ремнями. Волокнистый пучок проходит между рабочими поверхностями по траектории, обеспечивающей последовательное воздействие на него в двух зонах.

Ремни перемещаются во взаимно противоположных направлениях, вследствие чего создаются две зоны передачи крутильного воздействия. К основным параметрам регулирования относятся скорость движения ремней относительно скорости выпуска волокнистого продукта, а также геометрические характеристики зоны контакта. Протяжённая зона взаимодействия обеспечивает интенсивную передачу крутильного воздействия на волокнистый продукт. Вместе с тем представленная конструкция ориентирована преимущественно на переработку стандартного прядильного сырья, а эффективность её применения для прядомых волокнистых отходов в доступных технических решениях не оценивалась. Поэтому возможность её использования при переработке отходов, характеризующихся различной длиной волокон, неоднородностью состава и повышенным содержанием коротких волокон, требует отдельного экспериментального исследования.

Основное внимание в известных разработках уделяется переработке традиционного волокнистого сырья, тогда как влияние профиля рабочего органа, параметров вращения и интенсивности ложного кручения на формирование пряжи из вторичного волокнистого сырья требует дополнительного изучения.

Сравнительный анализ механизмов ложного кручения. Сравнение рассмотренных конструкций показывает общую тенденцию перехода от точечного контакта рабочего органа с волокнистым продуктом к протяжённому взаимодействию и от преимущественно пассивного воздействия к управляемому регулированию параметров ложной крутки.

Сопоставление показывает, что развитие механизмов ложного кручения происходит одновременно по нескольким направлениям. Первое связано с повышением эффективности передачи крутильного воздействия, второе – с расширением диапазона регулирования, третье – со снижением динамических нагрузок и повышением надёжности.

Отдельное направление связано с оптимизацией фрикционной поверхности. Исследования показывают, что материал и геометрические характеристики контактной поверхности крутильного органа механизмов ложного кручения оказывают существенное влияние на качество получаемой пряжи и количество её дефектов [19].

Таблица 1. Сравнительная характеристика рассмотренных механизмов ложного кручения

Критерий	**Система разделения волокнистого продукта [14]**	**Вращающееся устройство [15]**	**Двухременная система [17]**	**Традиционное кольцевое прядение**
Принцип воздействия	Разделение и индивидуальное ложное кручение субпучков	Вращающийся ложно-крутиль-ный элемент	Протяжённое фрикционное воздействие двух ремней	Специальное ложнокрутильное воздействие отсутствует
Характер контакта	Точечный/ локальный	Точечный/локальный	Протяжённый	-
Количество зон воздействия	Несколько вариантов	Одна основная зона	Две зоны	-

Критерий	Система разделения волокнистого продукта [14]	Вращающееся устройство [15]	Двухременная система [17]	Традиционное кольцевое прядение
Управление параметрами	Настройка режима ложной крутки	Регулирование частоты вращения	Скорость ремней и геометрия контакта	Определяется традиционной системой прядения
Остаточный крутильный момент	Может быть существенно снижен при оптимальном режиме	Может регулироваться	Может быть снижен	Как правило, выше, чем в модифицированных системах
Влияние на ворсистость	Снижение	Снижение	Потенциально значительное снижение	Базовый уровень
Возможность снижения постоянной крутки	Есть	Есть	Есть	Ограничена условиями устойчивого прядения
Конструктивная сложность	Высокая	Средняя/высокая	Средняя	Базовая конструкция
Перспективность промышленного применения	Ограниченная конструктив-ными особенностями	Требует точной настройки	Высокая потенциальная применимость	Высокая

Таким образом, преимущество протяжённых ременных систем заключается не только в увеличении длины контакта, но и в возможности более равномерного распределения силового и крутильного воздействия по длине взаимодействия.

Перспективы развития устройств ложного кручения. Современное развитие кольцевого прядения характеризуется стремлением к повышению производительности, снижению энергозатрат и стабилизации процесса формирования пряжи. Обзор современных исследований высокоскоростного кольцевого прядения показывает, что механизмы ложного кручения рассматриваются как одно из направлений повышения устойчивости процесса и улучшения качества пряжи [2].

Одним из перспективных направлений является интеграция механизмов ложного кручения с компактными системами прядения. Компактирование волокнистого пучка само по себе способствует уменьшению размеров треугольника кручения, поэтому совместное использование компактирующего и ложнокрутильного воздействия может обеспечить дополнительный эффект [5].

Другим направлением является автоматизация контроля параметров процесса. В перспективных конструкциях величина ложной крутки может регулироваться в зависимости от линейной плотности продукта, скорости выпуска, свойств волокна и текущей стабильности процесса.

Особое значение имеет обеспечение стабильности ложной крутки. Исследования показывают, что вариации ложной крутки могут быть описаны с использованием кинематических моделей и связаны с изменением параметров процесса и свойств получаемой пряжи [18].

Перспективными направлениями являются: автоматический контроль параметров ложной крутки; разработка адаптивных систем регулирования; применение износостойких фрикционных материалов; оптимизация геометрии контактных поверхностей; интеграция

устройств ложного кручения с компактными системами прядения; применение бесконтактных пневматических способов воздействия; использование цифровых систем мониторинга качества пряжи; применение методов математического моделирования и искусственного интеллекта для оптимизации режимов процесса; оценка энергоэффективности различных конструктивных типов ложнокрутителей.

Современная работа Jiang, Guo и Gao, опубликованная в 2026 году, показывает сохранение исследовательского интереса к фрикционным механизмам ложного кручения: устройство рассматривается как средство повышения эффективности формирования специальной пряжи, а скорость механизма ложного кручения и величина основной крутки исследуются как взаимосвязанные параметры процесса [6].

Заключение

Проведённый анализ показал, что ложное кручение является эффективным инструментом управления процессом формирования пряжи при кольцевом прядении. Введение дополнительной временной крутки в зоне между передней вытяжной парой и зоной окончательного формирования пряжи позволяет изменить геометрию треугольника кручения, повысить степень вовлечения периферийных волокон и создать условия для снижения ворсистости и остаточного крутильного момента.

Анализ рассмотренных конструкций показывает последовательное развитие устройств ложного кручения от локального механического или пневматического воздействия к вращающимся и далее к протяжённым ременным системам. При этом основными направлениями совершенствования являются повышение эффективности передачи крутильного воздействия, расширение возможностей регулирования и повышение технологической стабильности.

Наиболее перспективными представляются конструкции с протяжённым фрикционным контактом и двумя зонами ложного кручения, поскольку они обеспечивают более продолжительное взаимодействие с волокнистым продуктом и создают возможности для более равномерного управления процессом формирования пряжи.

Дальнейшее развитие механизмов ложного кручения связано с автоматизацией контроля, адаптивным регулированием, совершенствованием фрикционных материалов и интеграцией устройств в современные компактные и автоматизированные кольцепрядильные системы.

Отдельного исследования требует применение устройств ложного кручения при переработке прядомых волокнистых отходов. По сравнению с кондиционным волокнистым сырьём такие отходы характеризуются более широким диапазоном длины волокон, повышенной неоднородностью, наличием повреждённых волокон и изменённой способностью к вытягиванию. Поэтому эффективность существующих устройств ложного кручения, разработанных преимущественно для стандартного сырья, не может быть автоматически перенесена на прядомые волокнистые отходы. Определение оптимальных конструктивных и технологических параметров устройства ложного кручения для такого сырья является перспективным направлением дальнейших исследований.

Список литературы

1. Махкамова Ш.Ф., Темиров Ш.И. Исследование влияния механизма ложного кручения на процесс формирования кольцевой пряжи // Universum: технические науки. – 2022. – № 4 (97). – С. 40–43.
2. Abdkader A., Hossain M. A Critical review on recent developments and solutions in the high-speed ring spinning process // Textile Research Journal. – 2023. – Т. 93, № 23. – P. 5485–5504. – DOI: 10.1177/00405175231194793.
3. Araujo M.D., Smith G.W. Spirality of knitted fabrics. Part II: The effect of yarn spinning technology on spirality // Textile Research Journal. – 1989. – Т. 59, № 6. – P. 350–356.
4. Barella A., Manich A.M. Friction spun yarns versus ring and rotor spun yarns: resistance to abrasion and repeated extensions // Textile Research Journal. – 1989. – Т. 59, № 12. – P. 767–769.
5. Basal G., Oxenham W. Effects of some process parameters on the structure and properties of compact spun yarns // Textile Research Journal. – 2006. – Т. 76, № 7. – P. 567–575.
6. Jiang W., Guo M., Gao W. Research on the application of friction false-twister in staple core-spun yarn spinning // Textile Research Journal. – 2026. – Т. 96, № 1. – P. 126–137. – DOI: 10.1177/00405175241304061.
7. Klein W. The Rieter Manual of Spinning. Volume 1: Technology of Short-staple Spinning. – Winterthur: Rieter Machine Works Ltd., 2016. – 80 P.
8. Lawrence C.A. Fundamentals of Spun Yarn Technology. – Boca Raton: CRC Press, 2003. – 524 P.
9. Lord P.R. Handbook of Yarn Production: Technology, Science and Economics. – Woodhead Publishing. – 2003. – 504 P.
10. Lord P.R., Mohamed M.H. The performance of open-end, twistless, and ring yarns in weft knitted fabrics // Textile Research Journal. – 1974. – Т. 44, № 7. – P. 405–414.
11. Sengupta A.K., Sreenivasa Murthy K.R. Structure of fiber assembly during yarn formation in rotor spinning // Textile Research Journal. – 1994. – Т. 64, № 10. – P. 692–694.
12. Tao Hua. Production, properties and structures of short staple low torque singles ring yarn for weaving: PhD thesis. – Hong Kong: The Hong Kong Polytechnic University, 2007. – 265 P.
13. Tao X., Xu B. Manufacturing method and apparatus for torque-free singles ring spun yarns: US Patent № 6 860 095 B2. – Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office, 2005.
14. Tao X., Xu B., Wong S.-K. Method and apparatus for manufacturing a singles ring yarn: US Patent № 7 096 655 B2. – Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office, 2006.
15. Tao X., Hua T., Xu B., Feng J. Method and apparatus for manufacturing slalom false twisting on ring yarn: US Patent Application № 2010/0024376 A1. – Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office, 2010.
16. Xu B.G., Tao X.M., Leung C.S. A comparative study of cotton knitted fabrics and garments produced by the modified low twist and conventional ring yarns // Fibers and Polymers. – 2010. – Т. 11, № 6. – P. 899–904.

17. Xu D., Gao C., Fan H., Yang W., Fang J., Liu K., Xu W. The relevance of false-twist addition on ring spun yarns by means of rotary threaded surfaces // Textile Research Journal. – 2022. – T. 92, № 11–12. – P. 1796–1806. – DOI: 10.1177/00405175211063908.
18. Yin R., Tao X.M., Xu B.G. Variation of false twist on spinning process stability and resultant yarn properties in a modified ring spinning frame // Textile Research Journal. – 2018. – T. 88, № 16. – P. 1876–1892. – DOI: 10.1177/0040517517712099.
19. Yin R., Tao X.M., Xu B.G. Yarn and fabric properties in a modified ring spinning system considering the effect of the friction surface of the false-twister // Textile Research Journal. – 2020. – T. 90, № 5. – P. 572–580. – DOI: 10.1177/0040517519873057.

References

1. Makhkamova Sh.F., Temirov Sh.I. [Investigation of the Effect of False Twist Mechanism on the Process of Ring Yarn Formation] // Universum: tekhnicheskie nauki. – 2022. – No. 4 (97). – P. 40–43. (In Russ.).
2. Abdkader A., Hossain M. A Critical review on recent developments and solutions in the high-speed ring spinning process // Textile Research Journal. – 2023. – Vol. 93, No. 23. – P. 5485–5504. – DOI: 10.1177/00405175231194793.
3. Araujo M.D., Smith G.W. Spirality of knitted fabrics. Part II: The effect of yarn spinning technology on spirality // Textile Research Journal. – 1989. – Vol. 59, No. 6. – P. 350–356.
4. Barella A., Manich A.M. Friction spun yarns versus ring and rotor spun yarns: resistance to abrasion and repeated extensions // Textile Research Journal. – 1989. – Vol. 59, No. 12. – P. 767–769.
5. Basal G., Oxenham W. Effects of some process parameters on the structure and properties of compact spun yarns // Textile Research Journal. – 2006. – Vol. 76, No. 7. – P. 567–575.
6. Jiang W., Guo M., Gao W. Research on the application of friction false-twister in staple core-spun yarn spinning // Textile Research Journal. – 2026. – Vol. 96, No. 1. – P. 126–137. – DOI: 10.1177/00405175241304061.
7. Klein W. The Rieter Manual of Spinning. Volume 1: Technology of Short-staple Spinning. – Winterthur: Rieter Machine Works Ltd., 2016. – 80 P.
8. Lawrence C.A. Fundamentals of Spun Yarn Technology. – Boca Raton: CRC Press, 2003. – 524 P.
9. Lord P.R. Handbook of Yarn Production: Technology, Science and Economics. – Woodhead Publishing. – 2003. – 504 P.
10. Lord P.R., Mohamed M.H. The performance of open-end, twistless, and ring yarns in weft knitted fabrics // Textile Research Journal. – 1974. – Vol. 44, No. 7. – P. 405–414.
11. Sengupta A.K., Sreenivasa Murthy K.R. Structure of fiber assembly during yarn formation in rotor spinning // Textile Research Journal. – 1994. – Vol. 64, No. 10. – P. 692–694.
12. Tao Hua. Production, properties and structures of short staple low torque singles ring yarn for weaving: PhD thesis. – Hong Kong: The Hong Kong Polytechnic University, 2006. – 265 P.

13. Tao X., Xu B. Manufacturing method and apparatus for torque-free singles ring spun yarns: US Patent No. 6,860,095 B2. – Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office, 2005.
14. Tao X., Xu B., Wong S.-K. Method and apparatus for manufacturing a singles ring yarn: US Patent No. 7,096,655 B2. – Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office, 2006.
15. Tao X., Hua T., Xu B., Feng J. Method and apparatus for manufacturing slalom false twisting on ring yarn: US Patent Application No. 2010/0024376 A1. – Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office, 2010.
16. Xu B.G., Tao X.M., Leung C.S. A comparative study of cotton knitted fabrics and garments produced by the modified low twist and conventional ring yarns // Fibers and Polymers. – 2010. – Vol. 11, No. 6. – P. 899–904.
17. Xu D., Gao C., Fan H., Yang W., Fang J., Liu K., Xu W. The relevance of false-twist addition on ring spun yarns by means of rotary threaded surfaces // Textile Research Journal. – 2022. – Vol. 92, No. 11–12. – P. 1796–1806. – DOI: 10.1177/00405175211063908.
18. Yin R., Tao X.M., Xu B.G. Variation of false twist on spinning process stability and resultant yarn properties in a modified ring spinning frame // Textile Research Journal. – 2018. – Vol. 88, No. 16. – P. 1876–1892. – DOI: 10.1177/0040517517712099.
19. Yin R., Tao X.M., Xu B.G. Yarn and fabric properties in a modified ring spinning system considering the effect of the friction surface of the false-twister // Textile Research Journal. – 2020. – Vol. 90, No. 5. – P. 572–580. – DOI: 10.1177/0040517519873057.

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОДОВОЛЬСТВЕННЫХ ПРОДУКТОВ И ПИЩЕВАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

Статья поступила в редакцию: 18.05.2026
Статья принята к публикации: 01.10.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 665.3.0022.3

DOI: 10.32743/UniTech.2026.151.10.23488

Исследование технологических режимов обработки масличного сырья перед холодным прессованием

Бойназарова Юлдуз Анваровна
преподаватель
Каршинский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Карши
E-mail: yulduz.boynazarova@gmail.com

Investigation of processing conditions for oilseed raw materials prior to cold pressing

Boynazarova Yulduz
teacher
Karshi State Technical University
Republic of Uzbekistan, Karshi

Аннотация

В настоящей статье исследованы технологические режимы предварительной обработки семян чёрного тмина (*Nigella sativa L.*) и лука (*Allium cepa L.*) перед получением масла методом холодного прессования. Цель исследования — установить влияние предварительной тепловой и гидротермической обработки на выход масла и определить эффективные условия обработки сырья. В ходе экспериментов семена подвергали сухому нагреву, увлажнению с последующей тепловой обработкой, а также обработке паром с последующей тепловой обработкой. Масло получали методом холодного прессования на лабораторной установке «OIL PRESS PROFESSIONAL». Эффективность способов обработки оценивали по выходу масла и жмыха, а также по потере влаги. Наибольший выход масла отмечен при увлажнении с последующей тепловой обработкой: для семян чёрного тмина он составил 26,12 %, для семян лука — 15,60 %, что превышает показатели контрольных образцов на 5,15 и 4,53 процентного пункта соответственно. В исследованных условиях наиболее эффективным режимом признана влаготепловая обработка семян чёрного тмина при 100 °C и семян лука

Библиографическое описание: Бойназарова Ю.А. Исследование технологических режимов обработки масличного сырья перед холодным прессованием // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23488

при 80 °C в течение 30 минут. Полученные результаты свидетельствуют о возможности повышения эффективности извлечения масла путём выбора условий предварительной обработки перед холодным прессованием.

Abstract

This study investigated technological conditions for the pretreatment of black cumin (Nigella sativa L.) and onion (Allium cepa L.) seeds prior to oil extraction by cold pressing. The aim was to determine the effects of thermal and hydrothermal pretreatments on oil yield and identify effective conditions for raw material preparation. In the experiments, seeds were subjected to dry heating, moistening followed by heat treatment, and steaming followed by heat treatment. Oil was extracted by cold pressing using an “OIL PRESS PROFESSIONAL” laboratory unit. Treatment effectiveness was evaluated based on oil and press cake yields and moisture loss. The highest oil yields were obtained after moistening followed by heat treatment, reaching 26.12 % for black cumin seeds and 15.60 % for onion seeds, exceeding the control values by 5.15 and 4.53 percentage points, respectively. Under the conditions investigated, hydrothermal treatment at 100 °C for black cumin seeds and 80 °C for onion seeds, each for 30 minutes, was identified as the most effective treatment regime. The results demonstrate the potential to improve oil extraction efficiency by selecting appropriate pretreatment conditions prior to cold pressing.

Ключевые слова: чёрный тмин, семена лука, холодное прессование, тепловая обработка, увлажнение, выход масла, технологический режим.

Keywords: black cumin, onion seeds, cold pressing, heat treatment, moistening, oil yield, process conditions.

Введение

В настоящее время возрастающее внимание потребителей к вопросам здоровья способствует повышению спроса на безопасные пищевые продукты, полученные с минимальной технологической обработкой с применением экономически и экологически приемлемых технологий. В связи с этим усиливается интерес к маслам холодного отжима. Данный способ позволяет извлекать масло при минимальной обработке сырья без применения органических растворителей. При этом лучше сохраняются природные биологически активные соединения, определяющие пищевую ценность масла. Окислительная стабильность масел холодного отжима зависит от вида сырья, жирнокислотного состава, содержания природных антиоксидантов, а также условий производства и хранения. [9].

Жирнокислотный состав масел зависит от ряда факторов, в том числе от вида семян, условий выращивания, сроков сбора урожая, условий окружающей среды и хранения, предварительной обработки семян перед экстракцией, методов экстракции и условий переработки [2].

Растительные масла являются важным источником пищевых липидов. В их состав входят ненасыщенные жирные кислоты и витамины, имеющие существенное значение для организма. Замена насыщенных жиров ненасыщенными в рационе может способствовать снижению уровня холестерина липопротеинов низкой плотности и риска развития атеросклероза [1].

Холодное прессование представляет собой способ получения масла механическим отжимом без дополнительного нагревания сырья. Температура получаемого масла зависит от условий прессования, а его кислотное число — прежде всего от качества сырья и степени гидролиза липидов. Масла холодного отжима, соответствующие требованиям качества и безопасности, могут использоваться без рафинации; их очистку осуществляют посредством отстаивания и фильтрации [3].

В исследованиях, проводимых в нашей республике и направленных на производство высококачественных растительных масел, предусматривается повышение качества масла, расширение ассортимента и обеспечение пищевой безопасности за счёт предварительной электрофизической обработки низкосортных семян хлопчатника с высокой опушённостью.

Изучено влияние инфракрасной (ИК) обработки при температуре 75–80 °C на физико-механические свойства и влажность семян хлопчатника сортов Бухара-6 и Бухара-8. Установлено, что ИК-обработка существенно не изменяет физико-механические свойства семян, однако снижает их опушённость и несколько повышает выход масла. Изменение влажности зависит от продолжительности обработки. Наиболее эффективным признан режим обработки в течение 45–60 секунд при температуре 70–80 °C [4].

В последние годы растёт интерес к получению масел из семян бахчевых культур и их применению в косметике. В частности, масло семян дыни Калахари, полученное холодным прессованием, используют в производстве кремов для увлажнения, восстановления и очищения кожи лица. Основной недостаток этого способа — низкий выход масла [5].

Другой способ получения масла из семян бахчевых культур включает очистку, сортировку, измельчение, сушку и прессование. Сушку проводят в шнековом аппарате сначала при температуре 100–110 °C в течение 2–3 минут, затем при температуре не выше 60 °C в течение 20–23 минут до достижения влажности 3–5 %. После этого семена подвергают крупному измельчению [6].

Семена нетрадиционных культур привлекают всё больше внимания благодаря специфическим химическим свойствам входящих в их состав компонентов и возможности расширения производства пищевых и функциональных продуктов [8].

Семена чёрного тмина (*Nigella sativa L.*), а также получаемые из них нерафинированное и эфирное масла издавна широко используются в традиционном питании и народной медицине. В связи с этим чёрный тмин служит объектом многочисленных научных исследований, направленных на изучение его пищевой ценности и биологической активности [10].

Проведённые исследования показали, что выбор оптимальных параметров тепловой обработки в технологической линии получения масла из виноградных косточек положительно влияет на качество масла и эффективность процесса. На основании анализа действующей нормативной документации и литературных источников рекомендуется проводить тепловую обработку мезги виноградных косточек при температуре 50–70 °C [7].

Эффективность получения масла из семян чёрного тмина (*Nigella sativa L.*) и лука (*Allium cepa L.*) методом холодного прессования зависит от условий предварительной подготовки сырья. Поэтому в настоящем исследовании изучены способы тепловой и гидротермической обработки семян перед прессованием. Цель исследования — определить влияние указанных способов обработки на влажность семян и выход масла при холодном прессовании, а также установить оптимальные температуру и продолжительность обработки для каждого вида сырья.

Материалы и методы

В качестве объектов исследования выбраны два вида масличных семян:

• семена чёрного тмина — получаемое из них масло широко применяется в фармацевтической промышленности и пользуется высоким спросом. Оно служит источником биологически активных соединений, обладающих противовоспалительными, антиоксидантными и иммуномодулирующими свойствами, и представляет собой ценное сырьё для производства лекарственных препаратов, функциональных пищевых продуктов и косметических средств.

• семена лука — содержат полезные для организма человека вещества, среди которых основными биологически активными компонентами являются органические соединения серы (аллиин, аллицидин, диметилтрисульфид), флавоноиды (кверцетин, кемпферол, изорамнетин) и фенольные соединения. Аллицидин обладает выраженными антимикробными свойствами и проявляет активность в отношении таких пищевых патогенов, как Staphylococcus aureus, Listeria monocytogenes, Salmonella typhimurium. В Узбекистане семена лука впервые исследуются в качестве масличного сырья.

Общая характеристика физических показателей семян, использованных в исследовании, представлена в таблице 1.

Таблица 1. Физические показатели исследованных масличных семян

Вид масличного сырья	Влажность, %	Масса 1000 семян	Масса 1 м³ семян, кг	Порозность, %
Семена чёрного тмина	6,9–7,8	4,1–5,7	525–585	46,1
Семена лука	4,1-6,4	3,8-4,0	485-510	49,8

Общая характеристика химических показателей семян, использованных в исследовании, представлена в таблице 2.

Таблица 2. Химический состав исследованных масличных семян

Вид масличного сырья	Масличность, %	Белки, %	Клетчатка, %	Зольность, %
Семена чёрного тмина	25,3–38,5	19,8–21,6	3,8	0,58
Семена лука	21,8-25,8	15,7-26,9	3,4	0,62

На первом этапе для опытов по предварительной обработке масличного сырья перед прессованием отбирали по 1 кг (1000 г) семян чёрного тмина и лука. Семена очищали от примесей на ситах с диаметром отверстий 1,5 мм, после чего определяли их влажность. Затем проводили пробное получение масла традиционным методом холодного прессования. Далее семена подвергали тепловой обработке при температуре от 80 до 130 °С с шагом 10 °С. По результатам серии опытов определяли оптимальные продолжительность и температуру обработки, а также влажность сырья перед холодным прессованием при получении масла из семян чёрного тмина и лука. Для получения масла использовали лабораторную установку модели «OIL PRESS PROFESSIONAL».

Эксперимент включал контрольный вариант без предварительной обработки и три способа подготовки сырья: сухой нагрев; увлажнение с последующей тепловой обработкой; обработку паром с последующей тепловой обработкой. После подготовки семена подвергали холодному прессованию. Эффективность способов сравнивали по выходу масла и жмыха, а также по потере влаги.

Результаты и обсуждение

В ходе экспериментальных исследований было предусмотрено получение масла методом холодного прессования с предварительной обработкой масличного сырья тремя способами:

- Тепловая обработка.
- Увлажнение с последующей тепловой обработкой.
- Обработка паром с последующей тепловой обработкой.

Таблица 3. Влияние температуры тепловой обработки продолжительностью 30 минут на влажность семян чёрного тмина и лука

№	Температура обработки, °С	Продолжительность обработки, мин	Влажность семян чёрного тмина, %	Влажность семян лука, %
1	60	30	5,94	6.40
2	70	30	5,58	6.21
3	80	30	5	5,98
4	90	30	4,75	5,46
5	100	30	4,23	5
6	110	30	3,91	4,56
7	120	30	3.22	4,24
8	130	30	2.78	3,72

Определение оптимальной влажности масличных семян перед прессованием. Анализ данных таблицы 3 показал, что исходная влажность семян чёрного тмина (*Nigella sativa L.*) и лука (*Allium cepa L.*) является важным технологическим параметром при получении масла методом холодного прессования. По результатам экспериментов, в исследованных условиях максимальный выход масла был достигнут при влажности семян 5 %.

Анализ по определению оптимальной влажности масличных семян перед прессованием: на основании данных таблицы 3 установлено, что исходная влажность сырья является важным технологическим показателем при получении масла из семян чёрного тмина (*Nigella sativa L.*) и лука (*Allium cepa L.*) методом холодного прессования.

Таблица 4. Выход масла и потеря влаги в зависимости от способа обработки

Способ обработки	**Выход масла, %**	
Показатель	**Семена чёрного тмина**	**Семена лука**
Контроль (без обработки)	20,97	11,07
Сухая тепловая обработка (семена чёрного тмина — 100 °C, семена лука — 80 °C).	25,13	14,67
Увлажнение + тепловая обработка (семена чёрного тмина — 100 °C, семена лука — 80 °C).	26,12	15,60
Обработка паром + тепловая обработка (семена чёрного тмина — 100 °C, семена лука — 80 °C).	22,03	13,30

В ходе исследования семена чёрного тмина и лука подвергали предварительной обработке тремя предусмотренными экспериментом способами, после чего осуществляли извлечение масла методом холодного прессования. Результаты экспериментов представлены в таблице 4.

Представлены результаты получения масла методом холодного прессования из семян чёрного тмина и лука после предварительной обработки тремя предусмотренными экспериментом способами, а также различия в выходе масла.

Таблица 5. Технология тепловой обработки сырья перед получением масла методом холодного прессования

Сырьё	**Показатель**	**Без обработки (контроль)**	**Сухая тепловая обработка**	**Влаготепловая обработка**	**Обработка паром**
Семена чёрного тмина (температура обработки — 100 °C)	Выход масла, %	20,97	25,13	26,12	22,03
	Выход жмыха, %	79,03	72,82	70,93	74,77
	Потеря влаги, %	—	2,05	2,95	3,20
	Баланс:	**100**	**100**	**100**	**100**
Семена лука (температура обработки — 80 °C)	Выход масла, %	11,07	14,67	15,60	13,30
	Выход жмыха, %	88,93	80,53	80,60	82,70
	Потеря влаги, %	—	4,80	3,80	4,00
	Баланс:	**100**	**100**	**100**	**100**

Данные таблицы 5 показывают, что предварительная термическая обработка семян чёрного тмина и репчатого лука влияет на выход масла и жмыха при холодном прессовании. В контрольном образце семян чёрного тмина, не подвергавшемся термической обработке, выход масла составил 20,97 %, а выход жмыха — 79,03 %. Эти показатели были приняты в качестве критериев сравнения для оценки эффективности способов предварительной обработки. Выход масла в контрольном образце характеризует не общее содержание масла в семенах, а долю масла, извлечённого в данных условиях прессования.

По результатам исследования, при обработке сухим теплом выход масла из семян чёрного тмина достиг 25,13 %, что на 4,16 процентного пункта выше контрольного значения; влажность семян составляла 5 %. Для семян репчатого лука выход масла увеличился с 11,07 до 14,67 %, а выход жмыха снизился с 88,93 до 80,53 %.

Наибольший выход масла наблюдался при сочетании увлажнения и термической обработки: для семян чёрного тмина он составил 26,12 %, для семян репчатого лука — 15,60 %. Выход масла из семян чёрного тмина увеличился на 5,15 процентного пункта по сравнению с контролем; влажность семян составляла 5 %. Полученные результаты могут быть обусловлены изменением белково-липидных структур под воздействием влаги и тепла, способствующим облегчению выделения масла.

При обработке паром выход масла из семян чёрного тмина составил 22,03 %, из семян лука — 13,30 %, а потеря влаги — 3,20 и 4,00 % соответственно. Выход масла при данном способе оказался ниже, чем при других способах обработки, что свидетельствует о большей эффективности сочетания увлажнения и тепловой обработки.

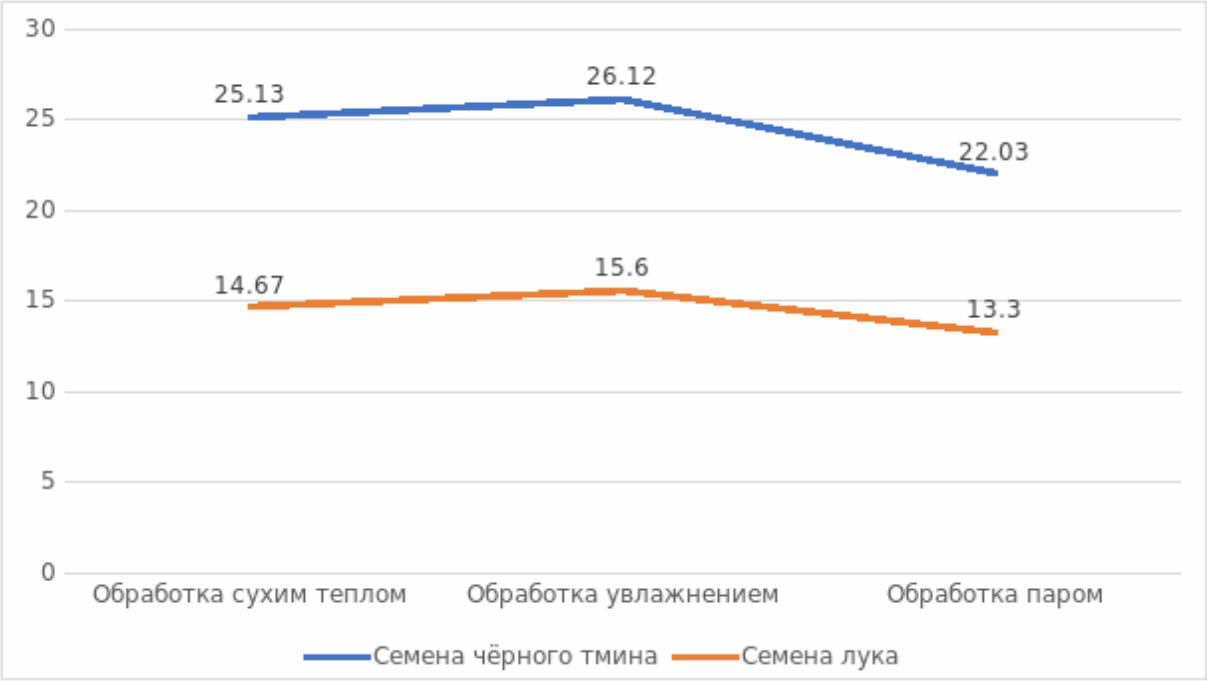


Рисунок 1. Влияние способов предварительной обработки семян чёрного тмина и лука на выход масла при холодном прессовании

Согласно диаграмме, наибольший выход масла наблюдался при обработке увлажнением: для семян чёрного тмина он составил 26,12 %, для семян лука — 15,60 %. При обработке паром эти показатели составили 22,03 и 13,30 % соответственно. Результаты показывают, что среди сравниваемых способов обработка увлажнением обеспечивает более эффективное извлечение масла.

Заключение

На основании полученных результатов установлено, что из трёх исследованных способов предварительной обработки масличного сырья наиболее эффективным оказался второй — увлажнение и тепловая обработка с последующим холодным прессованием. Наилучшие результаты получены при влажно-тепловой обработке семян чёрного тмина при температуре 100 °C и семян лука при 80 °C в течение 30 минут.

При сочетании увлажнения и тепловой обработки выход масла из семян чёрного тмина составил 26,12 % против 20,97 % в контроле, а из семян лука — 15,60 % против 11,07 %. Абсолютное увеличение составило соответственно 5,15 и 4,53 процентного пункта. Практическая значимость результатов заключается в возможности повышения выхода масла за счёт выбора способа подготовки сырья перед холодным прессованием.

Список литературы

1. Байболов К., Кусаинов А.М., Байболова Л.К. Сравнительный анализ технологического процесса и физико-химических свойств масел черного тмина и кунжутного как БАД к пище // Вестник Семипалатинского университета имени Шакарима. – 2011. – № 4 (56). – С. 58–63.
2. де Карвальо К.Г.П. и др. de Carvalho C.G.P. et al. Fatty acid profiles of oil obtained from mid-oleic sunflowers grown in tropical region // Journal of the American Oil Chemists' Society. – 2019. – Т. 96, № 9. – P. 1019–1025. – DOI: 10.1002/aocs.12258.
3. Мирзоев, Г.Х. Разработка технологии получения растительного масла и высокопротеинового жмыха из семян дыни: автореф. дис. … канд. техн. наук. – / Г, 2015. – 24 с.
4. Саидмуратов У.А., Бадриддинов С.Н. Сверхвысокочастотное и инфракрасное термообработки хлопковой мятки в среды расворителя // Современные материалы, техника и технологии. научно-практический журнал. – 2017. – № 1 (9). – С. 174–179.
5. Франко Е.П. Семена дыни-перспективный источник растительных масел // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 2009. – С. 15–17.
6. Чабан Л.Н., Аксененко А.И., Транский М.Б., Шапилов Г.С., Пономарева Т.Д. Способ получения масла семян бахчевых культур: патент РФ № 2179179. Опубл. 10.02.2002.
7. Шарипов Н.З., Кулдошева Ф.С., Жумаев Ж.N.Z. Sharipov, F.S. Kuldosheva, J. Jumaev. Research of the Effect of Factors on the Process of Separation of Shadow Seeds from the Peel/ Journal Eurasian Research Bulletin, Pages 86–91 // Eurasian Research Bulletin. – Т. 7. – P. 86–91.
8. Boynazarova Y., Farmonov J. Qora sedana urug‘i hujayrasi buzilishiga haroratning ta’siri bo‘yicha mikroskopik tadqiqotlar // Innovatsion texnologiyalar. – 2024. – Т. 53.
9. Mihai A.L. Negoiţă M., Horneţ G.A. Nutritional potential of some cold pressed vegetable oils in terms of fatty acids // Curr. Trends Nat. Sci. – 2020. – Т. 9. – P. 104–116. – DOI: 10.47068/ctns.2020.v9i17.012.

10. Ramadan M.F. Nutritional value, functional properties and nutraceutical applications of black cumin (Nigella sativa L.): an overview // International journal of food science and technology. – 2007. – T. 42. – P. 1208–1218.

References

1. Baybolov K., Kusainov A.M., Baybolova L.K. [Comparative analysis of the technological process and physicochemical properties of black cumin and sesame oils as dietary supplements] // Vestnik Semipalatinskogo universiteta imeni Shakarima. – 2011. – No. 4 (56). – P. 58–63. (In Russ.).
2. de Carvalho C.G.P. et al. de Carvalho C.G.P. et al. Fatty acid profiles of oil obtained from mid-oleic sunflowers grown in tropical region // Journal of the American Oil Chemists' Society. – 2019. – Vol. 96, No. 9. – P. 1019–1025. – DOI: 10.1002/aocs.12258.
3. Mirzoyev G.Kh. [Development of a technology for producing vegetable oil and high-protein press cake from melon seeds]. – Krasnodar, 2015. (In Russ.).
4. Saidmuratov U.A., Badriddinov S.N. [Microwave and infrared heat treatment of crushed cottonseed in a solvent medium] // Sovremennyye materialy, tekhnika i tekhnologii. – 2017. – No. 1 (9). – P. 174–179. (In Russ.).
5. Franko Ye.P. [Melon seeds as a promising source of vegetable oils] // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Pishchevaya tekhnologiya. – 2009. – No. 2–3. – P. 15–17. (In Russ.).
6. Chaban L.N., Aksenenko A.I., Transkiy M.B., Shapilov G.S., Ponomareva T.D. [Method for obtaining oil from seeds of cucurbit crops]: Russian Federation Patent No. 2179179. – Published 10.02.2002. (In Russ.).
7. Sharipov N.Z., Kuldosheva F.S., Jumaev J.N.Z. Sharipov, F.S. Kuldosheva, J. Jumaev. Research of the Effect of Factors on the Process of Separation of Shadow Seeds from the Peel/ Journal Eurasian Research Bulletin, Pages 86–91 // Eurasian Research Bulletin. – Vol. 7. – P. 86–91.
8. Boynazarova Y.A., Farmonov J.B. [Microscopic studies of the effect of temperature on cell disruption in black cumin seeds] // Innovatsion texnologiyalar. – 2024. – Vol. 53, No. 1. – P. 128–134.
9. Mihai A.L. Negoiţă M., Horneţ G.A. Nutritional potential of some cold pressed vegetable oils in terms of fatty acids // Current Trends in Natural Sciences. – 2020. – Vol. 9, No. 17. – P. 104–116. – DOI: 10.47068/ctns.2020.v9i17.012.
10. Ramadan M.F. Nutritional value, functional properties and nutraceutical applications of black cumin (Nigella sativa L.): an overview // International journal of food science and technology. – 2007. – Vol. 42. – P. 1208–1218.

Статья поступила в редакцию: 15.06.2026
Статья принята к публикации: 21.06.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 664.764.3

Разработка технологии пищевых продуктов пенной структуры с использованием яблочного и морковного пюре

Каланова Дилафруз Тошпулотовна
соискатель
степени PhD, Бухарский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Бухара
E-mail: qaxa8004@mail.ru

Development of technology for foam-structured food products using apple and carrot puree

Kalanova Dilafruz Toshpulatovna
PhD
Applicant, Bukhara State Technical University
Republic of Uzbekistan, Bukhara

Аннотация

В статье представлены результаты разработки технологии десертных пищевых продуктов пенной структуры с использованием местного яблочного и морковного пюре. Исследованы химико-технологические свойства пюре, их водосвязывающая и структурообразующая способность, а также взаимодействие с белковыми пенообразователями – сухим обезжиренным молочным остатком и яичным белком. Установлено, что гидротермическая обработка сырья паром с последующим охлаждением до 20 +/- 2 °C и протиранием обеспечивает получение пюре с высокой дисперсностью и повышенным содержанием растворимого пектина. Показано, что добавление плодово-овощного пюре снижает степень взбивания системы, однако повышает устойчивость пены за счет формирования белково-пектиновых комплексов и увеличения эффективной вязкости дисперсионной среды. Разработаны рецептуры мусса, самбука, крема и нишолды с яблочным и морковным пюре. Готовые изделия получили высокую органолептическую оценку и соответствовали микробиологическим требованиям при хранении в охлажденных условиях. Полученные результаты подтверждают технологическую целесообразность использования местного растительного сырья как натурального стабилизатора пенных десертных систем.

Библиографическое описание: Каланова Д.Т. Разработка технологии пищевых продуктов пенной структуры с использованием яблочного и морковного пюре // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23554

Abstract

The article presents the results of developing foam-structured dessert food products using local apple and carrot purees. The chemical and technological properties of the purees, their water-binding and structure-forming ability, and their interaction with protein foaming agents, namely skimmed milk powder residue and egg white, were studied. It was found that steam hydrothermal treatment followed by cooling to 20 +/- 2 °C and pulping provides purees with high dispersion and increased soluble pectin content. The addition of fruit and vegetable puree reduces the whipping degree of the system but increases foam stability due to protein-pectin complex formation and increased effective viscosity of the dispersion medium. Formulations of mousse, sambuk, cream and nisholda with apple and carrot puree were developed. The finished products received high organoleptic scores and met microbiological requirements under refrigerated storage. The results confirm the technological feasibility of using local plant raw materials as natural stabilizers for foam dessert systems.

Ключевые слова: пенные продукты, яблочное пюре, морковное пюре, пектин, белково-пектиновый комплекс, устойчивость пены, десертные изделия.

Keywords: foam products, apple puree, carrot puree, pectin, protein-pectin complex, foam stability, dessert products.

Введение

Одним из актуальных направлений современной пищевой технологии является создание продуктов с регулируемой структурой и стабильными потребительскими свойствами. Качество пенных пищевых систем определяется способностью дисперсной среды удерживать воздух, формировать мелкопористую структуру и сохранять ее в технологическом цикле. Устойчивость таких систем зависит от межфазных адсорбционных слоев, белков, полисахаридов, твердых частиц и режимов механического воздействия [1; 2].

В десертных изделиях пенной структуры применяются белковые пенообразователи, желирующие вещества и стабилизаторы. Перспективной альтернативой синтетическим добавкам является местное яблочное и морковное пюре, содержащее пектиновые вещества, клеточные стенки, органические кислоты и минеральные компоненты. Пектины и другие гидроколлоиды изменяют вязкость среды, участвуют в формировании белково-полисахаридных комплексов и повышают стабильность пен [3; 4].

Анализ научной литературы показывает, что растительные добавки широко изучаются как источники функциональных компонентов и технофункциональных веществ, однако влияние местных сортов яблока и моркови на формирование пенной структуры десертных продуктов остается недостаточно раскрытым. Особенно важными являются вопросы подготовки пюре, степени диспергирования клеточных структур, сорбционных свойств, взаимодействия пюре с молочными и яичными белками, а также качества готовых изделий. Целью работы является научное обоснование и разработка технологии десертных продуктов пенной структуры с использованием яблочного и морковного пюре как натуральных стабилизирующих добавок.

Материалы и методы

Объектами исследования служили яблоки сорта «Самарканд», морковь сорта «Мирзаки сурх», яблочное и морковное пюре, пектиновые препараты, сухой обезжиренный молочный остаток, яичный белок и десертные изделия пенной структуры: мусс, самбук, крем и нишолда. Вспомогательное сырье включало сахар, лимонную кислоту, ванилин, желатин и другие рецептурные компоненты.

Подготовка сырья включала сортировку, мойку, очистку, обработку паром, охлаждение и протирание. Оптимальная продолжительность паровой обработки составляла 15 мин для яблок и 50 мин для моркови. После охлаждения до 20 +/- 2 °С сырье протирали, содержание сухих веществ в пюре доводили до 14 %, а образцы хранили при 4 +/- 0,5 °С.

Химический состав пюре определяли стандартными методами пищевого анализа. Оценивали сухие вещества, сахара, азотистые вещества, золу, клеточные стенки, пектин, протопектин, гемицеллюлозу и целлюлозу. Пектиновые вещества определяли колориметрическим методом с карбазолом; сорбционные свойства – по изотермам сорбции с расчетом параметров БЭТ.

Пенообразующую способность оценивали по степени взбивания, устойчивости пены и среднему диаметру воздушных пузырьков. Использовали 20 %-ные системы на основе сухого обезжиренного молочного остатка и яичного белка. Смеси охлаждали до 4 +/- 0,5 °С, поддерживали pH 4,5 – 4,7 для молочной системы и pH 8,0 – 8,6 для яичного белка, затем взбивали 3 мин при 200 об/мин и 6 мин при 500 об/мин; нишолду взбивали 30 мин.

Качество готовых изделий оценивали по органолептическим и микробиологическим показателям. Органолептическую оценку проводили по пятибалльной шкале по вкусу и запаху, структуре и консистенции, цвету и внешнему виду. Микробиологические показатели контролировали после хранения при 6 +/- 0,5 °С.

Результаты и обсуждение

На первом этапе была установлена целесообразность использования паровой гидротермической обработки. По сравнению с варкой в воде обработка паром позволяла снизить потери сухих веществ: у яблок после 15 мин обработки потери составляли 0,96 +/- 0,13 %, тогда как при варке – 2,25 +/- 0,34 %; у моркови после 50 мин обработки паром – 0,86 +/- 0,12 %, при варке – 2,82 +/- 0,28 %. Следовательно, паровая обработка является более рациональной для подготовки пюре, поскольку обеспечивает сохранение растворимых веществ и структурообразующих компонентов клеточных стенок.

Важным технологическим фактором оказалась температура протирания. При охлаждении сырья до 20 +/- 2 °С перед механическим измельчением средний размер частиц клеточных стенок уменьшался до 102 мкм в яблочном пюре и до 121 мкм в морковном пюре, что было лучше, чем при протирании горячего сырья. Увеличение дисперсности способствовало повышению водосвязывающей способности и формированию более однородной дисперсионной среды. Содержание пектина в пюре после выбранных режимов составляло 5,19 +/- 0,16 % сухих веществ для яблочного пюре и 6,23 +/- 0,16 % для морковного пюре.

Таблица 1. Технологические свойства яблочного и морковного пюре

Показатель	Яблочное пюре	Морковное пюре
Оптимальная паровая обработка, мин	15	50
Средний размер частиц клеточных стенок, мкм	102	121
Пектин, % к сухим веществам	5,19 +/- 0,16	6,23 +/- 0,16
Протопектин, % к сухим веществам	4,44 +/- 0,13	6,64 +/- 0,11
Выделившаяся вода при прессовании, %	50,4 +/- 0,5	46,1 +/- 0,4
Степень метоксилирования пектина, %	76,08 +/- 0,18	52,94 +/- 0,17
Молекулярная масса пектина, у.е.	67400 +/- 350	34600 +/- 300
Сорбированная вода А0, г/г	0,075	0,072
Удельная поверхность монослоя, м2/г	254	241
Объем пор адсорбента, см3/г	0,096	0,091

Изотермы сорбции имели S-образный характер. По параметрам монослойной адсорбции яблочное и морковное пюре были близки к яблочному пектину: среднее количество сорбированной воды составляло около 0,073 г/г, относительная влажность формирования монослоя – 29,5 %, удельная поверхность – 247,5 м2/г, объем пор – 0,093 см3/г. Это подтверждает участие пектин-клеточных компонентов в связывании влаги и стабилизации структуры.

Исследование белковых пенообразователей показало, что охлаждение смесей до 4 +/- 0,5 °С и регулирование кислотности существенно повышают технологические показатели. Для систем на основе сухого обезжиренного молочного остатка оптимальной была кислотность pH 4,5 – 4,7, для систем на основе яичного белка - pH 8,0 – 8,6. При этих условиях средняя степень взбивания увеличивалась до 85 – 90 %, а устойчивость пены возрастала на 35 – 40 %. Этот эффект можно объяснить повышением вязкости дисперсионной среды, снижением скорости дренажа жидкости в каналах Плато и формированием более прочных межфазных адсорбционных слоев.

Добавление яблочного и морковного пюре в белковые системы изменяло баланс между пенообразованием и стабилизацией. При увеличении содержания пюре от 2 до 10 % степень взбивания постепенно снижалась, так как твердые дисперсные частицы и полисахаридные компоненты повышали сопротивление механическому насыщению воздухом. Одновременно устойчивость пены увеличивалась, что связано с формированием белково-пектиновых комплексов после образования пены и с гидравлическим препятствием движению жидкой фазы между воздушными пузырьками.

Таблица 2. Пенообразующая способность белково-пюреевых композиций при содержании пюре 6 %

Композиция	Степень взбивания, %	Устойчивость пены, %
Сухой обезжиренный молочный остаток + яблочное пюре	257 +/- 12,4	64 +/- 1,7
Сухой обезжиренный молочный остаток + морковное пюре	242 +/- 12,4	67 +/- 1,5
Яичный белок + яблочное пюре	268 +/- 12,3	70 +/- 1,5
Яичный белок + морковное пюре	253 +/- 11,4	74 +/- 1,4

На основании полученных данных были разработаны рецептуры четырех групп изделий: мусса, самбука, крема и нишолды. В рецептуре мусса часть сухих веществ манной крупы заменяли сухим обезжиренным молочным остатком, что позволило улучшить пенообразование. Оптимальным было введение 1,2 % сухого обезжиренного молочного остатка: степень взбивания манной основы увеличивалась с 112 +/- 4,2 до 134 +/- 3,7 %, а средний диаметр воздушных пузырьков снижался со 175 +/- 1,3 до 157 +/- 1,2 мкм. В дальнейшем в мусс вводили 4,0 % яблочного или морковного пюре к сухим веществам.

Для самбука оптимальное количество яблочного или морковного пюре составляло 9,0 % к сухим веществам, для крема – 2,0 %, для нишолды – 1,5 %. Введение пюре в нишолду сопровождалось снижением массовой доли сухих веществ с 79,5 до 74,5 %, а также корректировкой содержания инвертного сиропа и лимонной кислоты. Несмотря на некоторое снижение степени взбивания по сравнению с контрольной нишолдой, опытные образцы сохраняли достаточную мелкопористость и стабильность структуры.

Таблица 3. Показатели качества разработанных десертных изделий с яблочным и морковным пюре

Изделие	Пюре, % к сухим веществам	Степень взбивания, % ябл./морк.	Диаметр пузырьков, мкм ябл./морк.	Органолептическая оценка, балл	МАФАнМ, КОЕ/г ябл./морк.
Мусс	4,0	138 +/- 6,4 / 136 +/- 7,2	146 +/- 1,2 / 144 +/- 1,4	15	4,6x10^2 / 4,8x10^2
Самбук	9,0	161 +/- 5,8 / 159 +/- 5,6	142 +/- 1,3 / 140 +/- 1,2	15	5,4x10^2 / 5,7x10^2
Крем	2,0	170 +/- 5,7 / 169 +/- 6,5	132 +/- 1,3 / 130 +/- 1,4	15	6,4x10^2 / 6,5x10^2
Нишолда	1,5	237 +/- 7,2 / 229 +/- 6,4	108 +/- 1,4 / 104 +/- 1,5	15	7,6x10^2 / 7,3x10^2

Органолептическая оценка показала, что опытные образцы всех разработанных изделий получили максимальную суммарную оценку – 15 баллов. По сравнению с контрольными рецептурами улучшались вкус и запах, структура и консистенция, а также внешний вид. Это связано с тем, что пюре придавало изделиям естественный цветовой оттенок, мягкий плодово-овощной вкус и способствовало формированию более устойчивой консистенции.

Микробиологические исследования подтвердили безопасность введения пюре. После хранения при 6 +/- 0,5 °С количество МАФАнМ не превышало 1х10^3 КОЕ/г; бактерии группы кишечной палочки и Salmonella не обнаружены. Количество дрожжей не превышало 50 КОЕ/г, плесневых грибов – 100 КОЕ/г.

Практическая апробация подтвердила производственную применимость технологии. Использование яблочного пюре в нишолде повысило доход на 14443,7 сум на 100 кг продукции и рентабельность на 1,0 %, а морковного пюре – на 6209,4 сум и 1,5 % соответственно.

Заключение

1. Научно обоснована возможность применения яблочного и морковного пюре как натуральных структурообразующих и стабилизирующих компонентов в технологии десертных продуктов пенной структуры.

2. Установлено, что обработка сырья паром, охлаждение до 20 +/- 2 °С и протирание позволяют получить пюре с высокой дисперсностью, развитой водосвязывающей способностью и параметрами сорбции, близкими к пектиновым системам.

3. Оптимальными условиями формирования белковых пенных систем являются охлаждение до 4 +/- 0,5 °С и регулирование кислотности: pH 4,5 – 4,7 для систем на основе сухого обезжиренного молочного остатка и pH 8,0 – 8,6 для яичного белка.

4. Показано, что увеличение количества яблочного и морковного пюре снижает степень взбивания, но повышает устойчивость пены благодаря образованию белково-пектиновых комплексов и увеличению эффективной вязкости дисперсионной среды.

5. Разработаны рецептуры мусса, самбука, крема и нишолды с яблочным и морковным пюре. Готовые изделия получили высокие органолептические оценки, соответствовали микробиологическим требованиям и могут быть рекомендованы для внедрения в предприятия общественного питания и пищевой промышленности.

Список литературы

1. Murray B.S. Recent developments in food foams // Current Opinion in Colloid & Interface Science. – 2020. – Т. 50. – Art. 101394. – DOI: 10.1016/j.cocis.2020.101394.
2. Ozcelik M., Kulozik U. The role of maltodextrin concentration in maintaining storage stability of dried fruit foams texturized using plant protein-polysaccharide blends // Foods. – 2023. – Т. 12. – Art. 1673. – DOI: 10.3390/foods12081673.
3. Gao Y., Liu R., Liang H. Food hydrocolloids: structure, properties, and applications // Foods. – 2024. – Т. 13. – Art. 1077. – DOI: 10.3390/foods13071077.
4. Trabert A., Schmid V., Keller J. et al. Chemical composition and technofunctional properties of carrot (Daucus carota L.) pomace and potato (Solanum tuberosum L.) pulp as affected by thermomechanical treatment // European Food Research and Technology. – 2022. – Т. 248. – P. 2451–2470. – DOI: 10.1007/s00217-022-04060-5.
5. Dickinson E. Food emulsions and foams: stabilization by particles // Current Opinion in Colloid & Interface Science. – 2010. – Т. 15, № 1–2. – P. 40–49. – DOI: 10.1016/j.cocis.2009.11.001.

6. Green A.J., Littlejohn K.A., Hooley P. et al. Formation and stability of food foams and aerated emulsions: hydrophobins as novel functional ingredients // Current Opinion in Colloid & Interface Science. – 2013. – T. 18, № 4. – P. 292–301. – DOI: 10.1016/j.cocis.2013.04.008.
7. Marinova K.G., Basheva E.S., Nenova B. et al. Physico-chemical factors controlling the foamability and foam stability of milk proteins: sodium caseinate and whey protein concentrates // Food Hydrocolloids. – 2009. – T. 23, № 7. – P. 1864–1876. – DOI: 10.1016/j.foodhyd.2009.03.003.
8. Eisner M.D., Jeelani S.A.K., Bernhard L., Windhab E.J. Stability of foams containing proteins, fat particles and nonionic surfactants // Chemical Engineering Science. – 1987. – T. 62, № 7. – P. 1974–1987. – DOI: 10.1016/j.ces.2006.12.029.
9. Indrawati L., Wang Z., Narsimhan G., Gonzalez J. Effect of processing parameters on foam formation using a continuous system with a mechanical whipper // Journal of Food Engineering. – 2008. – T. 88, № 1. – P. 65–74. – DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2007.12.014.
10. Schramm L.L. Emulsions, Foams, and Suspensions: Fundamentals and Applications. – Weinheim: Wiley-VCH, 2005. – 448 P.

Статья поступила в редакцию: 20.06.2026
Статья принята к публикации: 12.10.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 613.2+664+519.2

Разработка и математическое обоснование состава функциональной композитной крупы с повышенной биодоступностью железа

Камалова Фируза Рахматовна
докторант
Бухарский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Бухара
E-mail: kamalovafiruza884@mail.com
Хаитов Рауф Арифович
канд. техн. наук, доц.
Бухарский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Бухара
Атамуратова Тамара Ивановна
канд. техн. наук, доц.
Бухарский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Бухара
Рахмонов Кахрамон Санокулович
канд. техн. наук, доц.
Бухарский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Бухара

Development and mathematical substantiation of the composition of functional composite cereals with increased iron bioavailability

Kamalova Firuza
Researcher-applicant
Bukhara State Technical University
Uzbekistan, Bukhara
Khaitov Rauf
candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Bukhara State Technical University
Uzbekistan, Bukhara
Atamuratova Tamara
candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Bukhara State Technical University
Uzbekistan, Bukhara
Rakhmonov Kakhramon
candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Bukhara State Technical University
Uzbekistan, Bukhara

Библиографическое описание: Разработка и математическое обоснование состава функциональной композитной крупы с повышенной биодоступностью железа // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Камалова Ф.Р. [и др.]. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23555

Аннотация

В статье представлены результаты разработки функциональной композитной крупы антианемической направленности на основе зернового, бобового и фитосырья. Цель исследования заключалась в научном обосновании рецептурной композиции, обеспечивающей повышенное содержание железа, улучшенный аминокислотный профиль и более высокую потенциальную биодоступность негемового железа. В качестве сырья использованы цельносмолотая пшеничная крупа, нутовая мука, порошок листьев крапивы, порошок плодов облепихи и пшеничные отруби. Методология включала определение белка, железа, фитатов и аскорбиновой кислоты стандартными аналитическими методами, расчёт аминокислотного скора, органолептическую оценку и оптимизацию рецептуры методом поверхностей отклика. Для оценки биодоступности железа использовали расчётно-экспериментальный подход с учётом диализируемой фракции после статической in vitro модели пищеварения. Получены регрессионные зависимости, описывающие влияние доли нутовой муки, крапивы и облепихи на биодоступность железа и аминокислотную сбалансированность. Установлено, что оптимальное соотношение компонентов составляет: пшеничная крупа – 40,0 %, нутовая мука – 40,0 %, крапива – 7,0 %, облепиха – 5,0 %, отруби – 8,0 %. Композиция характеризуется содержанием железа 10,5±0,3 мг/100 г, белка 17,8±0,6 %, прогнозируемой биодоступностью железа 8,8±0,4 % и аминокислотным скором по лизину 94,2±1,8 %.

Abstract

The article presents the development of a functional composite cereal with anti-anemic orientation based on grain, legume and plant raw materials. The purpose of the study was to scientifically substantiate a formulation that provides increased iron content, improved amino acid profile and higher potential bioavailability of non-heme iron. Whole-ground wheat cereal, chickpea flour, nettle leaf powder, sea buckthorn fruit powder and wheat bran were used as the main components. The methodology included determination of protein, iron, phytates and ascorbic acid by standard analytical methods, calculation of amino acid score, sensory evaluation and formulation optimization using response surface methodology. Iron bioavailability was estimated by a calculation-experimental approach taking into account the dialyzable fraction after static in vitro digestion. Regression equations were obtained describing the influence of chickpea flour, nettle and sea buckthorn on iron bioavailability and amino acid balance. The optimal component ratio was established as follows: whole-ground wheat cereal – 40.0 %, chickpea flour – 40.0 %, nettle – 7.0 %, sea buckthorn – 5.0 %, wheat bran – 8.0 %. The developed composition provides iron content of 10.5±0.3 mg/100 g, protein content of 17.8±0.6 %, predicted iron bioavailability of 8.8±0.4 % and lysine amino acid score of 94.2±1.8 %.

Ключевые слова: функциональные продукты питания, железодефицитная анемия, биодоступность железа, нут, крапива, облепиха, фитаты, аскорбиновая кислота, математическое моделирование, поверхности отклика.

Keywords: functional food products, iron deficiency anemia, iron bioavailability, chickpea, nettle, sea buckthorn, phytates, ascorbic acid, mathematical modeling, response surface methodology.

Введение

Дефицит железа остаётся одной из наиболее распространённых форм алиментарных нарушений питания населения. Наиболее уязвимыми группами являются женщины репродуктивного возраста, дети, подростки и лица с несбалансированным рационом. Профилактика железодефицитных состояний требует не только увеличения общего поступления железа с пищей, но и повышения его фактической доступности для абсорбции.

Железо растительного происхождения находится преимущественно в негемовой форме, биодоступность которой существенно зависит от состава пищевой матрицы. Зерновые и бобовые продукты являются важными источниками белка, пищевых волокон и минеральных веществ, однако содержащиеся в них фитаты способны образовывать нерастворимые комплексы с ионами железа, цинка и кальция, снижая их усвоение. Поэтому при проектировании функциональных круп целесообразно учитывать не только валовое содержание железа, но и соотношение промоторов и ингибиторов его абсорбции.

Перспективным технологическим решением является комбинирование зерновых компонентов с бобовым сырьём и фитодобавками. Нутовая мука позволяет повысить содержание белка и компенсировать дефицит лизина, характерный для пшеничных продуктов. Порошок листьев крапивы может рассматриваться как растительный источник железа, магния, кальция, хлорофиллсодержащих и фенольных соединений. Облепиха, содержащая органические кислоты и аскорбиновую кислоту, способна повышать растворимость негемового железа и частично нивелировать ингибирующее действие фитатов.

Целью настоящего исследования являлось научное обоснование состава функциональной композитной крупы для профилактики железодефицитных состояний и оптимизация рецептурной композиции с применением методов математического моделирования.

Объекты и методы исследования

В качестве объектов исследования использовали цельносмолотую пшеничную крупу, нутовую муку крупнодисперсного помола, порошок листьев крапивы двудомной (Urtica dioica L.), порошок плодов или жмыха облепихи (Hippophae rhamnoides L.) и пшеничные отруби. Выбор компонентов осуществляли с учётом их химического состава, технологической совместимости и физиологической роли в формировании антианемической направленности продукта.

Подготовку сырья проводили по единой схеме: инспекция, удаление посторонних примесей, сушение при температуре не выше 50 °С до массовой доли влаги 8 – 10 %, измельчение и просеивание. Для обеспечения воспроизводимости рецептурных опытов все компоненты нормировали по влажности и смешивали в лабораторном смесителе в течение 8 – 10 мин.

Массовую долю белка определяли по методу Кьельдаля с пересчётом общего азота на белок по коэффициенту 6,25. Содержание железа определяли методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии после сухого озоления образцов в соответствии с принципами AOAC 999.11; результаты выражали в мг/100 г сухого продукта. Содержание

фитиновой кислоты определяли колориметрическим методом по фосфатному комплексу после кислотной экстракции, а содержание аскорбиновой кислоты – титриметрическим методом с 2,6-дихлорфенолиндофенолом. Анализы выполняли не менее чем в трёх параллельных повторностях.

Потенциальную биодоступность железа оценивали как сочетание расчётного коэффициента доступности и доли диализируемого железа после статического in vitro моделирования желудочно-кишечного пищеварения. Модель включала последовательные фазы имитации желудочного и кишечного переваривания с контролем pH, ферментативной активности и времени экспозиции. Такой подход позволил учитывать влияние органических кислот, фитатов и белково-углеводной матрицы продукта на растворимость железа.

Органолептическую оценку опытных образцов проводили по пятибалльной шкале с учётом внешнего вида, цвета, запаха, вкуса, выраженности травянистого привкуса, консистенции и общей приемлемости. Дегустационная комиссия состояла из семи подготовленных экспертов. Образцы с выраженной терпкостью или травянистым послевкусием считали технологически ограниченными даже при высоких расчётных значениях биодоступности железа.

Оптимизацию рецептуры осуществляли методом поверхностей отклика (Response Surface Methodology, RSM). В качестве независимых факторов выбраны: z1 – содержание нутовой муки (30,0 – 50,0 %), z2 – содержание порошка крапивы (5,0 – 10,0 %), z3 – содержание порошка облепихи (3,0 – 7,0 %). Критериями оптимизации являлись: Y1 – биодоступность железа (%), Y2 – аминокислотный скор по лизину (%), Y3 – органолептическая оценка (балл).

Общую целевую функцию задавали в виде: $F(x)=\Sigma\omega i \cdot Ki \rightarrow max$, где ωi - коэффициент весомости показателя (биологическая ценность – 0,5; усвояемость железа – 0,4; органолептическая приемлемость – 0,1), Ki - нормированный показатель качества. Модельные ограничения задавали следующим образом: содержание железа Feобщ ≥10 мг/ 100 г; аминокислотный скор по лизину AKClys ≥90 %; органолептическая оценка не ниже 4,0 балла; суммарная доля компонентов равна 100 %.

Статистическую обработку результатов проводили с использованием дисперсионного и регрессионного анализа. Достоверность различий оценивали при уровне значимости $p \leq 0,05$. Результаты представляют как среднее значение ± стандартное отклонение. Адекватность регрессионных моделей оценивали по коэффициенту детерминации R^2 и анализу остаточных отклонений.

Результаты и обсуждение

Эффективность усвоения негемового железа определяется балансом между ингибирующими и активирующими факторами пищевой матрицы. Наиболее значимыми ингибиторами являются фитаты, а среди активаторов особую роль играют аскорбиновая и другие органические кислоты. Поэтому при разработке композиции учитывали не только содержание железа в отдельных компонентах, но и их взаимное влияние на растворимость микроэлемента.

В результате статистической обработки экспериментальных данных получены соответствующие регрессионные модели, описывающие влияние рецептурных факторов на целевые показатели качества. Формулы приведены без технических символов и случайных знаков, что устраняет ранее отмеченную редакционную ошибку.

по биодоступности железа:

$$Y1 = 6{,}85 + 0{,}21z1 + 0{,}54z2 + 0{,}83z3 + 0{,}12z1z2 + 0{,}48z2z3 – 0{,}031z2^2 – 0{,}027z3^2$$

по аминокислотному скору лизина:

$$Y2 = 74{,}8 + 0{,}92z1 + 0{,}41z2 + 0{,}25z3 + 0{,}36z1z2 – 0{,}17z2z3 – 0{,}012z1^2$$

по органолептической оценке:

$$Y3 = 4{,}62 + 0{,}04z1 – 0{,}08z2 – 0{,}06z3 – 0{,}015z2z3$$

Полученные коэффициенты детерминации составили соответственно R^2=0,94 для Y1, R^2=0,92 для Y2 и R^2=0,89 для Y3, что свидетельствует об удовлетворительной адекватности разработанных моделей для прогнозирования качества продукта в исследованной области факторов.

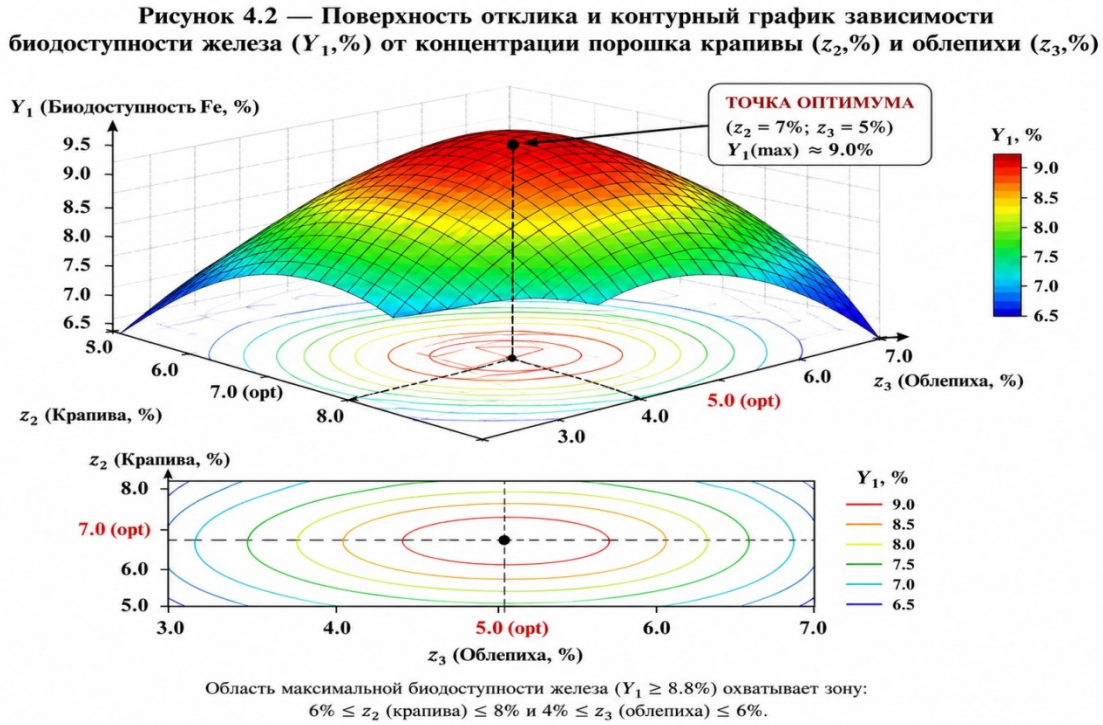


Рисунок 1. Поверхность отклика и контурный график зависимости биодоступности железа (Y1) от концентрации порошка крапивы (z2, %) и облепихи (z3, %)

Анализ поверхности отклика свидетельствует о наличии выраженного синергетического взаимодействия между порошком крапивы и порошком облепихи. Увеличение доли облепихи сопровождалось более интенсивным ростом показателя Y1 по сравнению с аналогичным изменением содержания крапивы, что связано с действием аскорбиновой и органических кислот на растворимость железа.

Контурный анализ показал, что зона максимальной биодоступности железа (Y1 ≥ 8,8 %) располагается в диапазоне: крапива – 6,0 – 8,0 %, облепиха – 4,0 – 6,0 %. Точка глобального оптимума зафиксирована при z2=7,0 % и z3=5,0 %. Дальнейшее увеличение концентрации

фитодобавок приводило к эффекту насыщения, при котором прирост биодоступности железа становился статистически незначимым (p>0,05), тогда как органолептический риск возрастал.

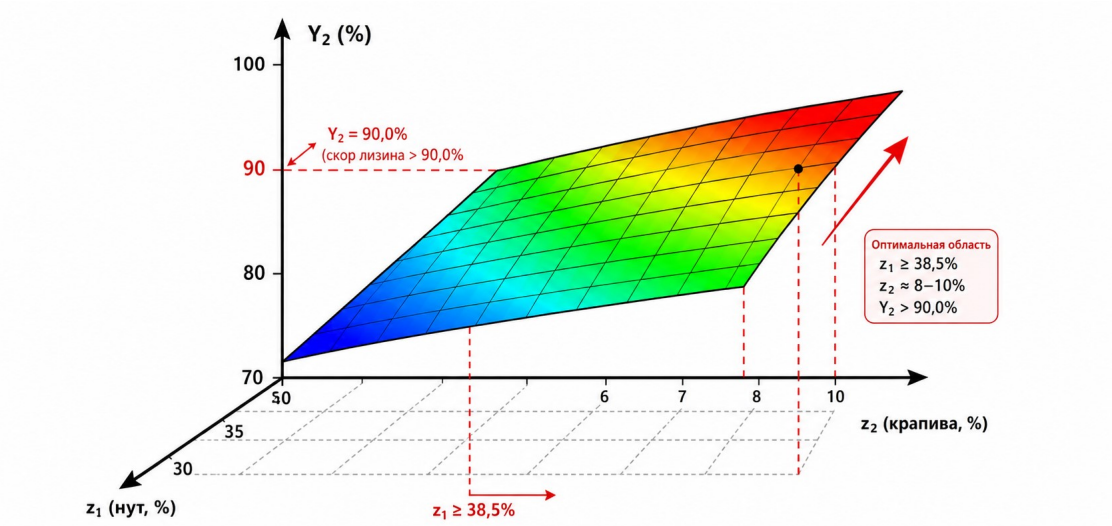


Рисунок 2. Поверхность отклика зависимости аминокислотного скора по лизину (%) от содержания нутовой муки (z_1) и крапивы (z_2) при фиксированной доле облепихи

Уравнение регрессии по аминокислотному скору (лизин):

$$Y_2 = 74{,}8 + 0{,}92z_1 + 0{,}41z_2 + 0{,}25z_3 + 0{,}36z_1z_2 - 0{,}17z_2z_3 - 0{,}012{z_1}^2$$

Рисунок 2. Поверхность отклика зависимости аминокислотного скора по лизину (%) от содержания нутовой муки (z1) и крапивы (z2) при фиксированной доле облепихи

Поверхность отклика Y2, характеризующая аминокислотный скор лизина, имеет вид практически линейной восходящей плоскости с выраженным положительным градиентом в направлении увеличения доли нутовой муки. Это подтверждает доминирующее влияние нутового компонента на биологическую ценность белкового комплекса.

Согласно построенной модели, достижение аминокислотного скора выше 90,0 % возможно при использовании не менее 38,5 % нутовой муки в сочетании с 7,0 – 10,0 % порошка крапивы. При совмещении областей допустимых значений установлена зона компромиссного оптимума, удовлетворяющая одновременно требованиям по биодоступности железа, аминокислотному составу и органолептической приемлемости.

Таблица 1. Оптимизированный состав функциональной крупы

Компонент	Массовая доля компонента, %
Цельносмолотая пшеничная крупа	40,0
Мука нута (крупнодисперсная)	40,0
Порошок крапивы	7,0
Порошок облепихи	5,0
Отруби пшеничные	8,0
Итого	100,0

Оптимизированная рецептура характеризуется технологической сбалансированностью: пшеничная основа обеспечивает структуру и привычные потребительские свойства, нутовая мука повышает белковую ценность, крапива служит источником железа и биологически активных веществ, облепиха усиливает растворимость негемового железа, а отруби повышают содержание пищевых волокон.

Таблица 2. Расчётно-экспериментальные показатели качества продукта

Компонент	Массовая доля железа, мг/100 г	Биодоступность железа, %	АКС по лизину, %	Массовая доля белка, %
Цельносмолотая пшеничная крупа	4,5±0,2	5,0±0,3	52,0±1,5	13,5±0,4
Мука нута	8,5±0,3	9,5±0,4	105,0±2,0	23,0±0,7
Порошок крапивы	45,0±1,1	11,0±0,5	112,0±2,4	25,0±0,8
Порошок облепихи	6,0±0,2	10,0±0,4	75,0±1,8	8,0±0,3
Отруби пшеничные	12,0±0,5	4,0±0,2	60,0±1,6	16,0±0,5
Оптимизированная смесь	10,5±0,3	8,8±0,4	94,2±1,8	17,8±0,6

Полученные данные свидетельствуют о высокой пищевой и биологической ценности разработанной крупы. Содержание железа в оптимизированной смеси составило 10,5±0,3 мг/100 г, что соответствует заданному ограничению модели. Биодоступность железа на уровне 8,8±0,4 % обусловлена сочетанием крапивы как минерального донора и облепихи как источника органических кислот. Нутовая мука обеспечила повышение аминокислотного скора по лизину до 94,2±1,8 %, что позволяет устранить типичный для зерновых продуктов дефицит данной незаменимой аминокислоты.

Таблица 3. Органолептическая оценка оптимизированной композиции

Показатель	Оценка, балл	Комментарий
Внешний вид и цвет	4,7±0,2	однородная крупяная смесь с умеренным зелёно-жёлтым оттенком
Запах	4,5±0,2	слабовыраженный растительный аромат без посторонних запахов
Вкус после варки	4,4±0,3	умеренная травянистость, без выраженной терпкости
Консистенция	4,6±0,2	рассыпчатая, без грубых включений
Общая приемлемость	4,55±0,20	образец соответствует требованиям для функционального продукта

Органолептическая оценка подтвердила технологическую обоснованность выбранных дозировок фитодобавок. При содержании крапивы выше 8,0 % и облепихи выше 6,0 % отмечалось усиление травянистого привкуса и терпкости, что ограничивает дальнейшее повышение их доли в рецептуре даже при потенциальном росте минеральной ценности.

Заключение

Проведённые исследования подтвердили возможность разработки функциональной композитной крупы антианемической направленности на основе зернового, бобового и фитосырья. Использование нутовой муки, порошков крапивы и облепихи в сочетании с цельносмолотой пшеничной крупой и пшеничными отрубями обеспечивает формирование многокомпонентной пищевой системы с повышенным содержанием железа, улучшенным аминокислотным составом и более высокой потенциальной доступностью микроэлементов.

С применением метода поверхностей отклика установлено, что оптимальные показатели достигаются при следующем составе: цельносмолотая пшеничная крупа – 40,0 %, нутовая мука – 40,0 %, порошок крапивы – 7,0 %, порошок облепихи – 5,0 %, пшеничные отруби – 8,0 %. Данный состав обеспечивает содержание белка 17,8±0,6 %, железа 10,5±0,3 мг/100 г, прогнозируемую биодоступность железа 8,8±0,4 % и аминокислотный скор по лизину 94,2±1,8 %.

Показано, что дальнейшее увеличение концентрации растительных добавок не сопровождается статистически значимым повышением биодоступности железа ($p>0,05$), но ухудшает органолептические характеристики продукта. Поэтому содержание крапивы 7,0 % и облепихи 5,0 % следует рассматривать как рациональные и технологически обоснованные параметры рецептуры.

Результаты исследования подтверждают эффективность применения принципов пищевой комбинаторики, аналитического контроля, органолептической оценки и математического моделирования при разработке функциональных продуктов профилактического назначения. Полученные данные создают научно-практическую основу для дальнейшей технологической апробации и внедрения разработанной крупы в производство.

Список литературы

1. Rădulescu L., Popescu M., Soare R. Nettle bread, a potential functional product // Scientific Papers. Series A. Agronomy. – 2024. – T. 67, № 2. – P. 640–647.
2. AOAC Official Method 999.11. Lead, cadmium, copper, iron and zinc in foods. Atomic absorption spectrophotometry after dry ashing. – AOAC International. – AOAC International. – 1999.
3. Brodkorb A., Egger L., Alminger M. et al. INFOGEST static in vitro simulation of gastrointestinal food digestion // Nature Protocols. – 2019. – T. 14. – P. 991–1014.
4. Brouns F. Phytic acid and whole grains for health controversy // Nutrients. – 2022. – T. 14.
5. Chondrou T., Kourkouta L., Fradelos E.C. et al. Dietary phytic acid, dephytinization, and phytase intervention for improving iron and zinc bioavailability // Nutrients. – 2024. – T. 16. – Art. 4069.
6. Devkota H.P., Paudel K.R., Hassan M.M. et al. Stinging nettle (Urtica dioica L.): nutritional composition, bioactive compounds and food applications // Molecules. – 2022. – T. 27. – Art. 5219.

7. FAO. Dietary protein quality evaluation in human nutrition. Report of an FAO Expert Consultation. – Rome: FAO, 2013. – 66 P.
8. Givens D.I., Punetha P., Humphries J.M. The importance of bioavailability of iron in plant-based foods in the context of treating iron-deficiency anaemia // International Journal of Food Science and Technology. – 2024. – T. 59. – P. 1–10.
9. Hurrell R., Egli I. Iron bioavailability and dietary reference values // The American Journal of Clinical Nutrition. – 2010. – T. 91.
10. Maietti A., Tedeschi P., Catani M. et al. Nutrient composition and antioxidant performances of bread-making products enriched with stinging nettle // Foods. – 2021. – T. 10. – Art. 938.
11. Mukwevho P.L., Nthangeni B., Akinmoladun O.F. et al. Optimisation using response surface methodology of process variables in functional food development // Processes. – 2023. – T. 11. – Art. 2503.
12. Nutritional Science and Clinical Dietetics: National Guidelines / ed. by V.A. Tutelyan, D.B. Nikityuk. – Moscow: GEOTAR-Media, 2020. – 656 P.
13. Peerkhan N., Nema P.K., Kumar K. Optimization of functional food formulation using response surface methodology // Journal of Food Science and Technology. – 2020. – T. 57. – P. 2209–2218.
14. Skalny A.V. Human Microelementoses: Diagnosis and Correction. – Moscow: GEOTAR-Media, 2019. – 304 P.
15. Sulaiman N., Givens D.I., Anitha S. et al. A narrative review: in vitro methods for assessing bioaccessibility/bioavailability of iron in plant-based foods // Frontiers in Sustainable Food Systems. – 2021. – T. 5. – Art. 727533.
16. Tambo Tene S., Womeni H.M., Kamdem J.P. et al. Application of response surface methodology in food process optimisation // Cogent Food & Agriculture. – 2023. – T. 9. – Art. 2279724.

Статья поступила в редакцию: 29.07.2026
Статья принята к публикации: 10.08.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 634.8+664.8.047+66.047

DOI: 10.32743/UniTech.2026.151.10.23597

Сравнительное экспериментальное исследование комбинированного ультразвукового и СВЧ-воздействия на процесс сушки винограда

Каримова Дилдора Шукриллоевна
базовый докторант
Бухарский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Бухара

Шарипов Нодиржон Замирович
PhD, доц.
кафедры Технологические машины и оборудование, Бухарский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Бухара

Ибрагимов Равшан Рустамович
PhD, доц.
кафедры Технологические машины и оборудование, Бухарский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Бухара
E-mail: ravshanibragimov@mail.ru

A comparative experimental study of combined ultrasonic and microwave treatment in grape drying

Karimova Dildora Shukrilloevna
Doctoral Candidate (PhD student)
Bukhara State Engineering and Technical Institute
Republic of Uzbekistan, Bukhara

Sharipov Nodirjon Zamirovich
PhD, Associate Professor
Department of Technological Machines and Equipment Bukhara State Engineering and Technical Institute
Republic of Uzbekistan, Bukhara

Ibragimov Ravshan Rustamovich
PhD, Associate Professor
Department of Technological Machines and Equipment Bukhara State Engineering and Technical Institute
Republic of Uzbekistan, Bukhara

Библиографическое описание: Каримова Д.Ш., Шарипов Н.З., Ибрагимов Р.Р. Сравнительное экспериментальное исследование комбинированного ультразвукового и СВЧ-воздействия на процесс сушки винограда // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23597

Аннотация

Статья посвящена сравнительному экспериментальному исследованию комбинированного ультразвукового (УЗ) и СВЧ-воздействия на процесс сушки винограда сорта «Кишмиш». Актуальность работы обусловлена необходимостью сокращения продолжительности сушки и энергозатрат при сохранении качества готовой продукции. Целью исследования являлась количественная оценка синергетического эффекта при одновременном и последовательном применении УЗ и СВЧ в сравнении с их раздельным воздействием. Эксперименты проводили с использованием универсальной лабораторной установки, объединяющей конвективную камеру, ультразвуковой и СВЧ-генераторы, вакуумную систему и средства измерения массы, температуры и давления; сравнивали шесть режимов — контроль, изолированное УЗ- и СВЧ-воздействие, одновременное УЗ+СВЧ, а также последовательные комбинации СВЧ→УЗ и УЗ→СВЧ. Для количественной оценки взаимодействия факторов использовали индекс синергии, рассчитанный по принципу независимости Bliss, а статистическую значимость различий определяли методами дисперсионного анализа и апостериорных сравнений. Установлено, что одновременное УЗ+СВЧ-воздействие статистически значимо превосходит по скорости сушки как раздельные, так и последовательные режимы, обеспечивая значение индекса синергии, достоверно превышающее единицу (SI≈1,07), что подтверждает наличие положительного взаимодействия факторов. Показано, что синергетический эффект связан с разрушением воскового слоя кутикулы винограда под действием ультразвуковой кавитации, облегчающим выход влаги при объёмном СВЧ-нагреве. Комбинированный режим обеспечивает не только сокращение продолжительности процесса, но и повышение органолептического качества готового продукта при незначительном росте энергозатрат по сравнению с изолированной СВЧ-сушкой. Результаты могут быть использованы при разработке промышленных технологий энергоэффективной сушки винограда и других плодово-ягодных культур.

Abstract

This paper presents a comparative experimental study of the combined effect of ultrasonic (US) and microwave (MW) treatment on the drying of 'Kishmish' grapes. The relevance of the study is determined by the need to reduce drying time and energy consumption while preserving product quality. The aim was to quantitatively assess the synergistic effect of simultaneous and sequential application of US and MW compared with each factor applied separately. Experiments were carried out using a versatile laboratory setup combining a convective chamber, ultrasonic and microwave generators, a vacuum system, and instruments for measuring mass, temperature, and pressure; six regimes were compared — control, isolated US and MW treatment, simultaneous US+MW, and sequential MW→US and US→MW combinations. A synergy index based on the Bliss independence principle was used to quantify the interaction between the factors, while the statistical significance of the differences was assessed by analysis of variance and post-hoc comparisons. Simultaneous US+MW treatment was found to significantly outperform both the separate and sequential regimes in drying rate, yielding a synergy index reliably above unity (SI≈1.07), confirming a positive interaction between the factors. The synergistic effect is shown to result from the disruption of the waxy cuticle layer by ultrasonic cavitation, which facilitates moisture release during volumetric microwave heating. The combined regime not only shortens the

drying process but also improves the sensory quality of the finished product, with only a marginal increase in energy consumption compared with microwave drying alone. The results can be used in developing industrial technologies for energy-efficient drying of grapes and other fruit crops.

Ключевые слова: комбинированная сушка, ультразвук, СВЧ-поле, виноград, синергетический эффект, кинетика сушки, энергосбережение.

Keywords: combined drying, ultrasound, microwave field, grapes, synergistic effect, drying kinetics, energy saving.

Введение

Согласно литературным данным, ультразвуковое (УЗ) и СВЧ-воздействие способны интенсифицировать сушку растительного сырья, однако механизмы их действия принципиально различны. УЗ (22 кГц, 60 Вт) создаёт кавитационные микротоки и звукокапиллярный эффект, снижающие поверхностное сопротивление массопереносу, что наиболее эффективно проявляется при 40–50 °C [3, 5]. СВЧ-поле (2450 МГц, 350–450 Вт), напротив, обеспечивает объёмный диэлектрический нагрев с внутренним парообразованием, интенсифицирующим массоперенос независимо от состояния поверхности продукта [11]. Принципиальное различие механизмов создаёт предпосылку для их взаимного усиления при совместном применении [6, 9]. На предыдущем этапе настоящего исследования нами было экспериментально установлено, что при 50 °C изолированное УЗ-воздействие сокращает продолжительность сушки винограда на 23,2 %, а изолированное СВЧ-воздействие — на 84,4 %, что и послужило основанием для перехода к изучению их совместного применения.

Синергия УЗ+СВЧ подтверждена для ряда других культур: Szadzińska с соавт. [1] показали для клубники существенное ускорение тепло- и массопереноса при незначительном росте энергопотребления; Kroehnke с соавт. [7], а также Mierzwa и Musielak [8] для моркови получили сокращение продолжительности сушки на 9–81 % при одновременном действии конвекции, УЗ и СВЧ; аналогичный положительный эффект отмечен и для яблок [10, 2]. Для винограда — объекта с плотной восковой кутикулой — количественная оценка синергии УЗ+СВЧ ранее не проводилась; исходя из установленных на предыдущем этапе значений (23,2 и 84,4 % для изолированных УЗ- и СВЧ-воздействий соответственно), аддитивное ожидание при их совместном применении составляет 86,2 %. Цель настоящей работы — экспериментально исследовать комбинированное УЗ+СВЧ-воздействие на кинетику сушки винограда с количественной оценкой синергетического эффекта (индекс SI) и определением рационального режима.

Материалы и методы

Объект — виноград сорта «Кишмиш» (Бухарская область), начальная влажность 78,5 ± 1,2 % (n=10); подготовка образцов — как на предыдущем этапе работы. Использовалась универсальная лабораторная установка, объединяющая конвективную сушильную камеру (40–70 °C, 1,0–2,5 м/с) лабораторной конструкции, ультразвуковой генератор УЗГ-1,5 (22 кГц, 60 Вт) с пьезоэлектрическим излучателем (ООО «Сонокс», Россия), СВЧ-генератор (2450

МГц, 0–800 Вт) с резонаторной камерой (ARTEL, Ўзбекистон), вакуумную систему (0,03 МПа) лабораторной конструкции, а также системы измерения массы (весы HR-200, A&D, Япония), температуры и давления лабораторной конструкции.

Проведены опыты по 6 режимам при 50 °C, 1,5 м/с, конечная влажность 15–16 %, n=6 (всего 36 опытов): контроль (C); УЗ (US, 60 Вт); СВЧ-вакуум (MW, 350 Вт, 0,03 МПа); одновременно УЗ+СВЧ (US+MW); последовательно СВЧ → УЗ (MW → US, СВЧ до влажности 40 %, затем УЗ) и УЗ → СВЧ (US → MW, УЗ до 40 %, затем СВЧ).

D_{eff} (м²/с) — эффективный коэффициент диффузии влаги, характеризующий интенсивность внутреннего массопереноса; его рассчитывали путём аппроксимации экспериментальных кривых сушки уравнением нестационарной диффузии влаги (второй закон Фика) в приближении одного члена ряда — по методике, применённой нами на предыдущем этапе настоящего исследования при изучении раздельного действия УЗ и СВЧ на кинетику сушки винограда того же сорта. Индекс синергии $SI = E_{obs}/E_{add}$, где E_{obs} - наблюдаемое сокращение времени сушки при УЗ+СВЧ (относительно контроля), $E_{add} = 1-(1-E_{US})(1-E_{MW})$ – аддитивное ожидание по раздельным эффектам УЗ (E_{US}) и СВЧ (E_{MW}). Индекс синергии рассчитывали согласно принципу независимости Bliss, широко применяемому для оценки аддитивного и синергетического взаимодействия независимых факторов воздействия. Значения SI>1 свидетельствуют о положительном взаимодействии, а SI>1,05 рассматривались как признак выраженного синергетического эффекта. SI > 1,05 — синергия; 0,95 ≤ SI ≤ 1,05 — аддитивность; SI < 0,95 — антагонизм. Качество продукта оценивали по 10-балльной шкале (цвет, текстура, форма, вкус). Оценку проводили пять независимых экспертов, итоговый балл рассчитывали как среднее арифметическое экспертных оценок. Статистика — SPSS Statistics 26: Перед выполнением однофакторного дисперсионного анализа проверяли нормальность распределения данных (критерий Шапиро–Уилка) и однородность дисперсий (критерий Левена). Во всех случаях предпосылки применения ANOVA выполнялись (p>0,05). однофакторный ANOVA, post-hoc Тьюки, t-тест, 95 % ДИ для SI методом бутстрепа (1000 итераций); α=0,05.

Результаты и обсуждение

Кинетика сушки

Кривые сушки, приведённые на рисунке 1, наглядно демонстрируют различие механизмов действия исследуемых факторов. В контрольном режиме продолжительность сушки составляет 31,5 ч, при этом на кривой отчётливо выражен длительный период постоянной скорости (рис. 1а), характерный для удаления преимущественно поверхностной влаги. Под действием ультразвука кривая сушки смещается влево, а продолжительность процесса сокращается до 24,2 ч (на 23,2 % относительно контроля) за счёт улучшения поверхностного массопереноса. СВЧ-воздействие приводит к принципиально иной кинетике: период постоянной скорости практически отсутствует, а продолжительность сушки сокращается до 4,9 ч (на 84,4 %), что свидетельствует о преобладании объёмного механизма тепло- и массопереноса. Наилучший результат обеспечивает одновременное УЗ+СВЧ-воздействие: время сушки сокращается до 4,1 ч (на 87,0 %), а соответствующая кривая

располагается ниже кривой изолированного СВЧ-режима на всём протяжении процесса (рис. 1б). Последовательные режимы занимают промежуточное положение между одновременным и изолированным СВЧ-воздействием: при варианте СВЧ→УЗ продолжительность сушки составляет 4,5 ч (сокращение на 85,7 %), при варианте УЗ→СВЧ — 4,3 ч (86,3 %). Как показано на рисунке 2, фактическое сокращение продолжительности сушки при одновременном УЗ+СВЧ-воздействии (87,0 %) статистически значимо превышает аддитивное ожидание, рассчитанное по раздельным эффектам факторов (86,2 %).

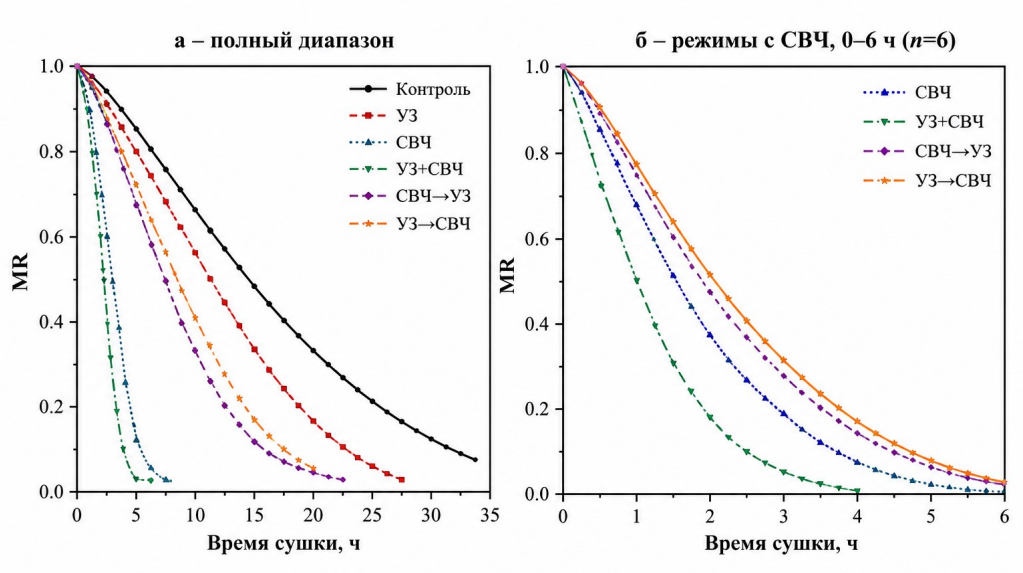


Рисунок 1. Кинетика сушки: а – все режимы; б – режимы с СВЧ, 0–6 ч (n=6)

Количественные показатели

Таблица 1. Сравнительные показатели режимов сушки ($\bar{x}$ ± SD, n=6)

Режим	τ, ч	Сокращ., %	D_{eff}, ×10⁻⁹ м²/с	E, МДж/кг	Качество, балл
Контроль	31,5 ± 1,8	–	0,243 ± 0,018	29,4 ± 1,6	7,8 ± 0,5
УЗ	24,2 ± 1,4	23,2 ± 2,8	0,382 ± 0,026	26,3 ± 1,3	8,3 ± 0,4
СВЧ	4,9 ± 0,3	84,4 ± 1,2	1,56 ± 0,14	32,5 ± 2,1	8,5 ± 0,5
УЗ+СВЧ	4,1 ± 0,3	87,0 ± 1,0	1,94 ± 0,18	32,8 ± 2,0	8,9 ± 0,3
СВЧ→УЗ	4,5 ± 0,4	85,7 ± 1,2	1,68 ± 0,13	33,8 ± 2,2	8,1 ± 0,5
УЗ→СВЧ	4,3 ± 0,3	86,3 ± 1,1	1,82 ± 0,14	33,2 ± 2,0	8,3 ± 0,4

D_{eff} максимален при УЗ+СВЧ ($1{,}94\times10^{-9}$ м²/с, что на 24,4 % выше, чем при изолированном СВЧ, и свидетельствует об улучшении массопереноса. Аналогичным образом, качество продукта также максимально при УЗ+СВЧ (8,9 балла), причём его отличие от изолированного СВЧ (8,5 балла) статистически значимо (p=0,038). Что касается энергозатрат, наименьшими они оказались при УЗ-воздействии (26,3 МДж/кг), а наибольшими — при последовательном режиме СВЧ→УЗ (33,8 МДж/кг).

Статистический анализ

Однофакторный ANOVA показал высокозначимое влияние режима на время сушки: $F(5,30)=486,3$; $p<0,001$. Размер эффекта был очень высоким ($\eta^2=0,988$), что свидетельствует о практически полном влиянии режима сушки на продолжительность процесса. Post-hoc Тьюки: СВЧ vs УЗ+СВЧ – $p=0,018$ (значимое отличие, синергия подтверждена); УЗ+СВЧ vs СВЧ→УЗ — $p=0,022$ и vs УЗ→СВЧ — $p=0,018$ (одновременное воздействие значимо лучше последовательного); СВЧ vs СВЧ→УЗ — $p<0,001$; СВЧ→УЗ vs УЗ→СВЧ — $p=0,324$ (не значимо). Итог: УЗ+СВЧ статистически значимо лучше СВЧ по скорости ($p=0,018$).

Индекс синергии

При EUS=0,232 и EMW=0,844 аддитивное ожидание Eadd= 0,862 (86,2 %). Наблюдаемое Eobs=0,870, откуда SI=Eobs/Eadd= 0,870/0,862=1,065; 95 % ДИ (бутстреп): 1,028–1,102«; (рис. 2). Поскольку нижняя граница ДИ (1,028) превышает 1,00, синергетический эффект статистически подтверждён (SI>1,05). Полученное значение значительно превышает порог аддитивности (SI=1), что свидетельствует о наличии положительного взаимодействия между ультразвуковым и микроволновым воздействиями. Нижняя граница доверительного интервала также превышает единицу, что подтверждает статистическую устойчивость выявленного синергетического эффекта.

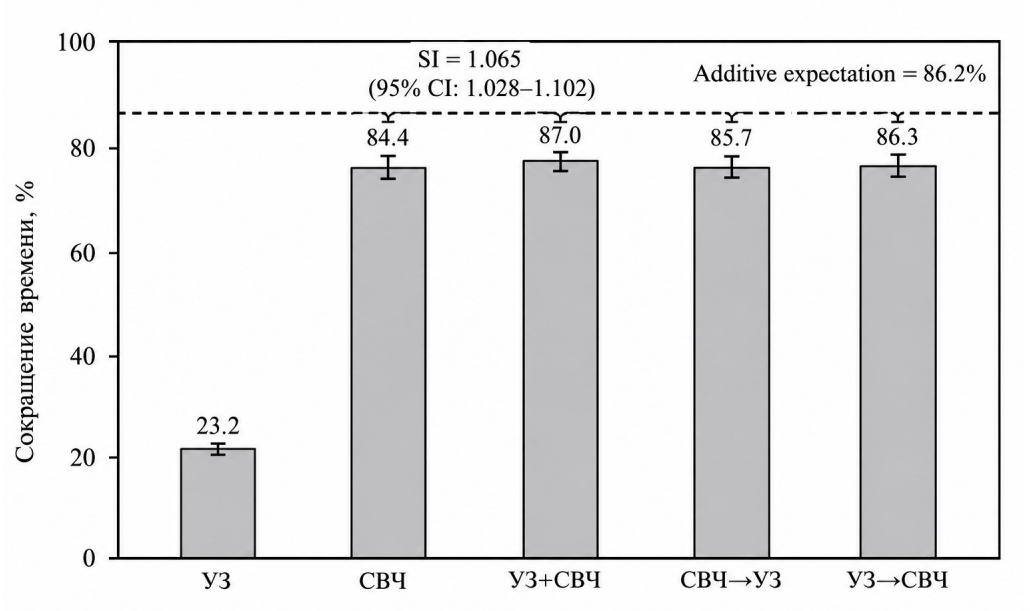


Рисунок 2. Сокращение τ по режимам, аддитивное ожидание и индекс синергии (n=6)

Синергия объясняется тем, что УЗ-кавитация разрушает восковой слой кутикулы, создавая микротрещины, через которые пар выходит быстрее [1, 7]. При СВЧ-нагреве температура продукта достигает 48–55 °C, что снижает кавитационную активность УЗ [5]. Кроме того, УЗ успевает проявить эффект, создавая микротрещины в кутикуле на начальном этапе сушки. Таким образом, совместное воздействие реализует двухступенчатый механизм интенсификации: ультразвук уменьшает сопротивление поверхностному массопереносу за

счёт образования микроканалов в кутикуле, тогда как СВЧ обеспечивает интенсивный объёмный нагрев и внутреннее испарение влаги. Одновременная реализация этих механизмов приводит к синергетическому ускорению процесса сушки.

Энергетическая эффективность

УЗ даёт наименьшие энергозатраты (26,3 МДж/кг, −10,5 % к контролю) ценой умеренного ускорения. СВЧ требует на 10,5 % больше энергии, чем контроль, но за счёт сокращения времени в 6,4 раза суммарное потребление за цикл ниже. УЗ+СВЧ (32,8 МДж/кг) лишь на 0,9 % выше СВЧ при значительном выигрыше в скорости (4,1 ч против 4,9 ч) и качестве (8,9 против 8,5 балла) (рис.3). Несмотря на незначительное увеличение удельных энергозатрат относительно СВЧ-сушки (около 0,9 %), статистически значимых различий между этими режимами не выявлено ($p>0,05$), тогда как прирост производительности и качества продукции оказался достоверным.

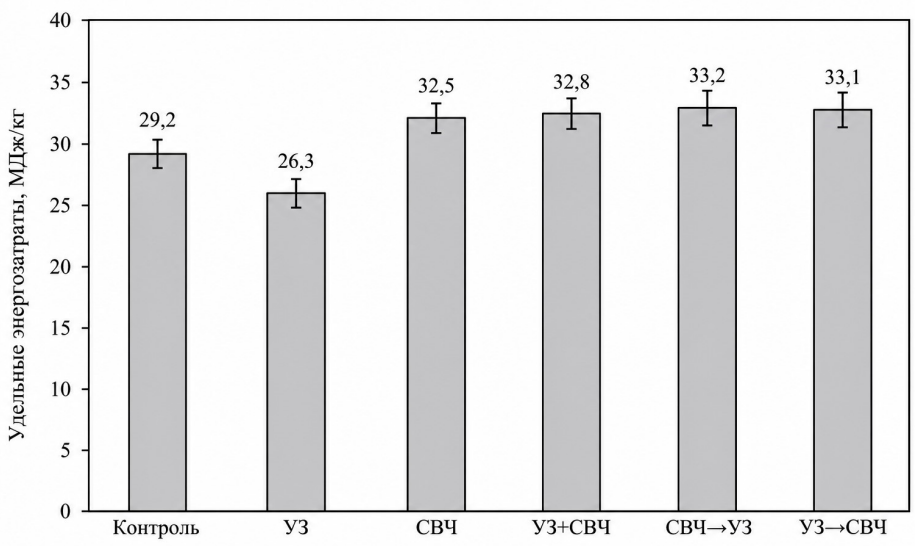


Рисунок 3. Удельные энергозатраты по режимам сушки (n=6)

Синергия УЗ+СВЧ, отмеченная для клубники [1] и моркови [7], получена при существенно меньшей мощности СВЧ и/или большей мощности УЗ; по данным обзоров [9, 11], синергия наиболее выражена при СВЧ до 200 Вт и УЗ свыше 100 Вт. При параметрах настоящей работы (СВЧ 350 Вт, УЗ 60 Вт) УЗ-кавитация усиливает паровой транспорт, создавая каналы для выхода пара с его плотной кутикулой.

Заключение

Сравнение шести режимов сушки винограда сорта «Кишмиш» при 50 °C показало, что СВЧ-вакуумная сушка (350 Вт) даёт максимальное сокращение времени (84,4 %, до 4,9 ч), тогда как УЗ (60 Вт) — умеренный эффект (23,2 %). Одновременное УЗ+СВЧ (87,0 %, 4,1 ч) статистически значимо лучше СВЧ ($p=0,018$); индекс синергии $SI=1,065$ подтверждает положительный синергетический эффект. Последовательные режимы СВЧ→УЗ и УЗ→СВЧ статистически хуже одновременного воздействия.

Причина синергии — УЗ-кавитация разрушает восковой слой кутикулы, усиливая выход пара, генерируемого СВЧ. Комбинированный режим энергозатратен (32,8 МДж/кг), незначительно выше СВЧ (32,5 МДж/кг), при значительном улучшении скорости и качества. Для промышленной сушки винограда рекомендуется одновременное УЗ+СВЧ-воздействие (350 Вт СВЧ, 60 Вт УЗ, 50 °С, вакуум 0,03 МПа) как наиболее эффективный режим. Перспективным направлением дальнейших исследований является оптимизация мощности ультразвукового и микроволнового воздействия, а также разработка промышленной установки непрерывного действия для энергоэффективной сушки винограда и других плодово-ягодных культур.

Список литературы

1. Szadzińska J., Kowalski S.J., Stasiak M. Microwave and ultrasound enhancement of convective drying of strawberries: Experimental and modeling efficiency // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2016. – T. 103. – P. 1065–1074. – DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer. 2016.08.001.
2. Szadzińska J., Waszkowiak K., Mierzwa D. Hybrid drying of apples: a comparison of continuous and intermittent process modes // Applied Sciences. – 2025. – T. 15, № 22. – Art. 12031. – DOI: 10.3390/app152212031.
3. Azzouz S., Guizani A., Jomaa W., Belghith A. Moisture diffusivity and drying kinetic equation of convective drying of grapes // Journal of Food Engineering. – 2002. – T. 55. – P. 323–330. – DOI: 10.1016/S0260-8774(02.
4. Burak L.Ch., Zavaley A.P. Combined ultrasound and microwave food processing: Efficiency review // Food Processing: Techniques and Technology. – 2024. – T. 54. – P. 342–357. – DOI: 10.21603/2074-9414-2024-2-2510.
5. García-Pérez J.V., Cárcel J.A., Mulet A., Riera E., Andrés R.R., Gallego-Juárez J.A. Ultrasonic drying for food preservation // Power Ultrasonics: Applications of High-Intensity Ultrasound. 2nd ed. – Cambridge: Woodhead Publishing, 2023. – P. 851–882.
6. Kowalski S.J., Mierzwa D. Ultrasound-assisted convective drying of biological materials // Drying Technology. – 2015. – T. 33. – P. 1851–1860.
7. Kroehnke J. Szadzińska J., Stasiak M., Radziejewska-Kubzdela E., Biegańska-Marecik R., Musielak G. Ultrasound- and microwave-assisted convective drying of carrots – process kinetics and product's quality analysis // Ultrasonics Sonochemistry. – 2018. – T. 48. – P. 249–258.
8. Mierzwa D., Musielak G. Microwave and ultrasound assisted rotary drying of carrot: Analysis of process kinetics and energy intensity // Applied Sciences. – 2024. – T. 14. – Art. 10676. – DOI: 10.3390/app142210676.
9. Muñoz-Almagro N., Prieto-Santiago V., Rico D., Martín-Diana A.B. Combined effect of ultrasound and microwave on food drying: A review // Innovative Food Science & Emerging Technologies. – 2023. – T. 84. – Art. 103283.
10. Musielak G. Mieszczakowska-Frąc M., Mierzwa D. Convective drying of apple enhanced with microwaves and ultrasound – process kinetics, energy consumption, and product quality approach // Applied Sciences. – 2024. – T. 14. – Art. 994. – DOI: 10.3390/app14030994.

11. Zhou S., Chen W., Fan K. Recent advances in combined ultrasound and microwave treatment for improving food processing efficiency and quality: A review // Food Bioscience. – 2024. – T. 58. – Art. 103683. – DOI: 10.1016/j.fbio.2024.103683.

Статья поступила в редакцию: 01.10.2026
Статья принята к публикации: 09.10.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 664.68:664.644.5

Многокритериальная оптимизация рецептур и оценка качества печенья с пониженным аллергенным потенциалом

Каримова Татьяна Яхшиевна
соискатель
Бухарский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Бухара
E-mail: gulinozfattiloyevna@gmail.com

Multi-criteria optimisation of formulations and quality assessment of cookies with reduced allergenic potential

Karimova Tatyana Yakhshiyevna
Degree Applicant
Bukhara State Technical University
Uzbekistan, Bukhara

Аннотация

Приведены результаты математического планирования эксперимента, регрессионного анализа и многокритериальной оптимизации рецептур сахарного печенья с пониженным аллергенным потенциалом. Цель исследования — разработка и оптимизация рецептур сахарного печенья с пониженным аллергенным потенциалом за счёт замены традиционных компонентов растительными аналогами. В опытных образцах меланж заменяли аквафабой нута, сливочное масло — растительным маслом, пшеничную муку высшего сорта — мукой второго сорта с отрубями либо безглютеновой смесью рисовой и кукурузной муки. Эксперимент проводили по плану Бокса–Бенкена с применением регрессионного анализа и многокритериальной оптимизации. Факторами служили дозировки аквафабы, растительного масла и волокнистого растительного компонента; откликами — расплываемость и органолептическая оценка. Получены уравнения регрессии второго порядка и определён компромиссный оптимум: X1 = +0,15; X2 = +0,81; X3 = +1,00 при D = 0,71. Опытные образцы соответствовали требованиям ГОСТ 24901–2023: влажность составила 6,0–6,1 %, содержание жира — 14,0–14,5 % против 18,2 % в контроле, намокаемость — 172–185 %. Дегустационная оценка составила 4,2 и 4,4 балла, энергетическая ценность снизилась с 458 до 405–412 ккал/100 г. Разработаны две рецептуры сахарного печенья с пониженным содержанием жира и энергетической ценностью при сохранении нормативных физико-

Библиографическое описание: Каримова Т.Я. Многокритериальная оптимизация рецептур и оценка качества печенья с пониженным аллергенным потенциалом // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23529

химических и приемлемых органолептических показателей. Практическая значимость состоит в возможности расширения ассортимента специализированных мучных кондитерских изделий.

Abstract

The results of experimental design, regression analysis, and multicriteria optimization of sugar cookie formulations with reduced allergenic potential are presented. The aim of the study was to develop and optimize sugar cookie formulations with reduced allergenic potential by replacing conventional ingredients with plant-based alternatives. In the experimental samples, egg mélange was replaced with chickpea aquafaba, butter with vegetable oil, and premium-grade wheat flour with second-grade wheat flour containing bran or a gluten-free blend of rice and corn flours. The experiment was carried out using a Box–Behnken design combined with regression analysis and multicriteria optimization. The factors were the levels of aquafaba, vegetable oil, and a fiber-rich plant component, while spreadability and sensory score were used as responses. Second-order regression equations were obtained, and a compromise optimum was identified: X1 = +0.15, X2 = +0.81, and X3 = +1.00 at D = 0.71. The experimental samples met the requirements of GOST 24901–2023: moisture content was 6.0–6.1 %, fat content was 14.0–14.5 % compared with 18.2 % in the control, and water absorption was 172–185 %. Sensory scores were 4.2 and 4.4 points, while the energy value decreased from 458 to 405–412 kcal/100 g. Two sugar cookie formulations with reduced fat and energy content were developed while maintaining standard physicochemical characteristics and acceptable sensory properties. The practical significance of the study lies in the possibility of expanding the range of specialized flour confectionery products.

Ключевые слова: сахарное печенье, аквафаба нута, план Бокса–Бенкена, уравнение регрессии, функция желательности Харрингтона, безглютеновое печенье, показатели качества.

Keywords: sugar cookies, chickpea aquafaba, Box–Behnken design, regression equation, Harrington desirability function, gluten-free cookies, quality indicators.

Введение

Традиционные рецептуры печенья могут включать пшеничную муку, яичные и молочные продукты, орехи. Эти ингредиенты относятся к компонентам, которые могут вызывать аллергические реакции или противопоказаны при отдельных заболеваниях и подлежат обязательному указанию в составе пищевой продукции [4, с. 10–11]. В Республике Узбекистан совершенствование профилактики аллергических заболеваний и оказания специализированной помощи предусмотрено постановлением Президента Республики Узбекистан от 23 ноября 2023 г. № ПП-371 [3, п. 1].

Одним из направлений модификации рецептур является замена яичных продуктов аквафабой — отваром нута, обладающим пенообразующими и эмульгирующими свойствами [10, с. 6–7]. При исключении пшеничной муки изменяются структурно-механические свойства теста, поэтому особое значение приобретают регулирование влажности и подбор соотношения рецептурных компонентов [2, с. 61–62; 6, с. 2]. Яблочный жмых представляет

интерес как источник пищевых волокон и полифенолов; его внесение влияет на водопоглощение, реологические характеристики теста и качество готовых изделий [9, с. 3244–3251; 11, с. 686–692].

Цель работы — определить рациональную область рецептурных параметров печенья с аквафабой нута, растительным маслом и волокнистыми компонентами и оценить качество разработанных изделий.

Материалы и методы

Объектами исследования служили три образца сахарного печенья: контроль-печенье «Южное» по рецептуре № 137 (пшеничная мука высшего сорта, сливочное масло, меланж); опыт 1-печенье ЭКО «Анти-Аллерджи» на смеси пшеничной муки 2 сорта и отрубей (4:1) с кунжутным маслом, аквафабой, яблочным жмыхом и подсолнечным шротом; опыт 2-безглютеновое печенье «Южное» на смеси рисовой и кукурузной муки (1:1) с подсолнечным маслом, аквафабой, изюмом и семенами подсолнечника. Аквафабу получали из нута сорта «Юлдуз».

Эксперимент планировали по трёхуровневому плану Бокса–Бенкена, предназначенному для построения моделей второго порядка [5, с. 455–458]. Факторами служили: X_1 — дозировка аквафабы нута; X_2 — дозировка растительного масла; X_3 — уровень внесения яблочного жмыха для опыта 1 или степень гидратации мучной смеси для опыта 2. В качестве откликов использовали расплываемость печенья Y_1, определяемую как отношение диаметра изделия к его высоте, и интегральную органолептическую оценку Y_2. Уровни варьирования факторов в расчёте на 100 кг сухой мучной основы приведены в таблице 1.

Данные обрабатывали с использованием полиномиальных моделей второго порядка, исключая коэффициенты, незначимые по критерию Стьюдента. Отклики объединяли в интегральный критерий D с использованием обобщённой функции желательности Харрингтона [8, с. 494–498].

Качество изделий лабораторных выпечек оценивали по органолептическим и физико-химическим показателям, предусмотренным ГОСТ 24901–2023 [1, с. 3–6]. Органолептические показатели определяли по ГОСТ 5897–90 и дополнительно оценивали по принятой в работе 5-балльной шкале. Массовую долю влаги определяли по ГОСТ 5900–2014, сахара — по ГОСТ 5903–89, щёлочность — по ГОСТ 5898–2022, намокаемость — по ГОСТ 10114–80; соответствующие методы контроля предусмотрены разделом 7 ГОСТ 24901–2023 [1, с. 7]. Значения гликемического индекса получены в ходе собственных исследований. Определения выполняли в трёх повторностях; результаты представляли как среднее значение ± стандартное отклонение. Уровень статистической значимости принимали равным 0,05.

Таблица 1. Уровни варьирования основных рецептурных факторов

Уровень	X_1 - аквафаба, кг	X_2-растительное масло, кг	X_3-волокнистый компонент, кг
Нижний (–1)	10,0	10,0	5,0
Центральный (0)	14,0	12,5	7,5
Верхний (+1)	18,0	15,0	10,0

Уровень	X_1 - аквафаба, кг	X_2-растительное масло, кг	X_3-волокнистый компонент, кг
Точка компромиссного оптимума	X_1 = +0,15 (14,6 кг)	X_2 = +0,81 (14,5 кг)	X_3 = +1,00 (10,0 кг)

Для многокритериальной оптимизации использовали обобщённую функцию желательности Харрингтона [8, с. 494–498]. По результатам расчётов наибольшее значение D = 0,71 получено в точке компромиссного оптимума: X_1 = +0,15; X_2 = +0,81; X_3 = +1,00.

Результаты и обсуждения

Для расплываемости в кодированных значениях X_1 и X_2 получена зависимость:

$$Y_1 = 5{,}20 + 0{,}80X_1 - 0{,}50X_2 + 0{,}30X_1X_2 - 0{,}15X_1^2 - 0{,}22X_2^2. \quad (1)$$

Положительный коэффициент при X_1 показывает, что увеличение доли аквафабы способствует росту расплываемости; отрицательный коэффициент при X_2 указывает на обратное влияние жировой фазы. Квадратичные члены подтверждают нелинейный характер процесса, а положительный коэффициент взаимодействия X_1X_2 (+0,30)-совместное действие гидроколлоидов аквафабы и липидной фазы масла. В пределах плана поверхность не имеет экстремума (рисунок 1, а): расплываемость изменяется от 3,23 до 5,90. Компромиссный технологический оптимум соответствует X_1 = +0,15 и X_2 = +0,81 (Y_1 = 4,80): в этой точке достигается пластичность полуфабриката, обеспечивающая сохранение чёткости контура и рельефа печенья.

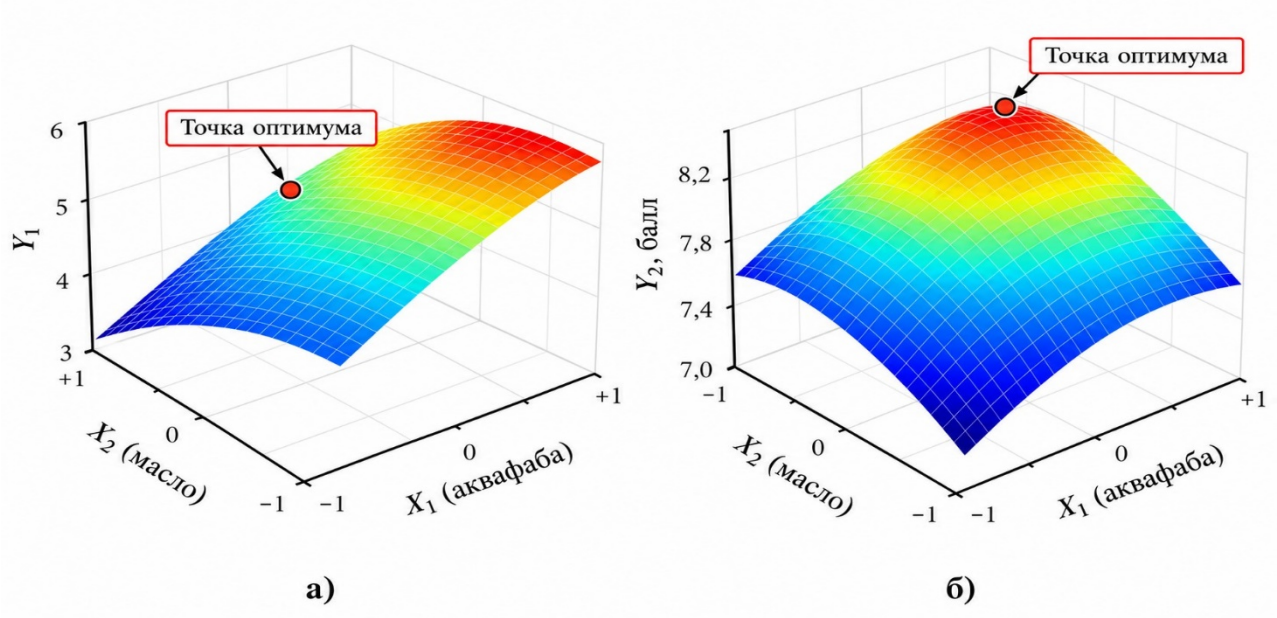


Рисунок 1. Поверхности отклика Y_1 (а) и Y_2 (б); маркеры-компромиссный оптимум и максимум оценки

Модель интегральной органолептической оценки после исключения статистически незначимых эффектов имеет вид:

$$Y_2 = 8{,}05 + 0{,}32X_1 + 0{,}26X_2 - 0{,}22X_1^2 - 0{,}16X_2^2. \quad (2)$$

Функция представляет собой параболический купол (рисунок 1, б), вершина которого (X_1 = +0,73; X_2 = +0,81; Y_2 = 8,27 балла) соответствует 16,9 кг аквафабы и 14,5 кг масла. Дальнейшее увеличение дозировок снижает оценку: избыток поверхностно-активных веществ нутового отвара придаёт тесту липкость, а избыток масла вызывает салистое послевкусие.

Оптимизация по обобщённой функции желательности Харрингтона дала наибольшее значение D = 0,71 в точке компромиссного оптимума (X_1 = +0,15; X_2 = +0,81; X_3 = +1,00), что соответствует оценке «хорошо» [8]. Рациональная область рецептурных параметров-15,0–18,0 кг аквафабы, 10,0–15,0 кг растительного масла и 5,0–10,0 кг волокнистого компонента на 100 кг мучной основы; такое соотношение способствует связыванию свободной влаги полисахаридами нута и частично компенсирует отсутствие клейковинного каркаса.

По результатам дегустации (рис.2) наивысшую оценку получил контрольный образец-4,8 балла: сливочное масло и пшеничная мука формируют характерную хрупкость, аромат и равномерную структуру.

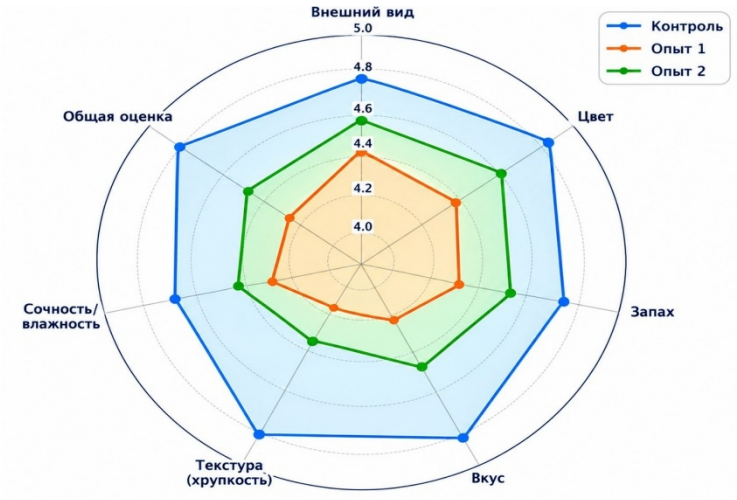


Рисунок 2. Профилограмма дегустационной оценки качества печенья

У образца 1 общая оценка снизилась до 4,2 балла, главным образом по показателям «вкус» и «текстура», при этом внешний вид и цвет оценены в 4,4–4,5 балла. Образец 2 более сбалансирован: по внешнему виду, цвету и запаху он ближе к контролю, итоговая оценка-4,4 балла.

По физико-химическим показателям все образцы соответствуют требованиям ГОСТ 24901–2023 (таблица 2); влажность составила 5,8–6,1 % при норме не более 10,0 %.

Таблица 2. Показатели качества исследуемых образцов печенья

Показатель	Норматив по ГОСТ 24901–2023 [1, с. 5–6]	Контроль	Опыт 1	Опыт 2
Массовая доля влаги, %, не более	10,0	5,8 ± 0,2	6,1 ± 0,2	6,0 ± 0,2
Массовая доля сахара в пересчёте на сахарозу, %, не более	35,0	32,5 ± 0,5	22,1 ± 0,4	31,8 ± 0,5
Массовая доля жира, %, не более	30,0	18,2 ± 0,3	14,5 ± 0,3	14,0 ± 0,3
Щёлочность, град, не более	2,0	1,5 ± 0,1	1,3 ± 0,1	1,4 ± 0,1

Показатель	Норматив по ГОСТ 24901–2023 [1, с. 5–6]	Контроль	Опыт 1	Опыт 2
Намокаемость, %, не менее	150,0	165 ± 5	185 ± 5	172 ± 5
Прочность на разлом, Н	-	12,5 ± 0,5	8,7 ± 0,4	9,2 ± 0,4
Размер крошки, мм	-	1,0 ± 0,2	1,7 ± 0,2	1,2 ± 0,2

Примечание. Норматив намокаемости не менее 150 % установлен для сахарного печенья толщиной 13 мм и менее.

По представленным в таблице 2 показателям массовой доли влаги, сахара, жира и щёлочности исследованные образцы соответствуют требованиям ГОСТ 24901–2023 к сахарному печенью [1, с. 5]. Влажность составила 5,8–6,1 % при нормативном значении не более 10,0 %.

Согласно примечанию 2 к таблице 2 ГОСТ 24901–2023, намокаемость печенья с добавлениями не определяют [1, с. 5]. Для исследованных образцов с такими добавлениями результаты определения намокаемости приведены как сравнительная технологическая характеристика.

В образце 1 массовая доля сахара снизилась до 22,1 % вследствие замены изюма яблочным жмыхом; в образце 2 она близка к контролю и составила 31,8 %. Массовая доля жира в опытных образцах находилась в пределах 14,0–14,5 % против 18,2 % в контроле, щёлочность составила 1,3–1,5 град. Повышение намокаемости, особенно в образце 1 - до 185 %, предположительно связано с водоудерживающей способностью волокнистых компонентов. Такое объяснение согласуется с опубликованными данными об увеличении водопоглощения мучных смесей при внесении яблочного жмыха [9, с. 3244–3251; 11, с. 686–692]. Пористость опытных образцов составила 22,0–25,0 %. Прочность на разлом снизилась до 8,7–9,2 Н против 12,5 Н в контроле. Наблюдаемые изменения могут быть связаны с уменьшением доли клейковинных белков и включением растительных частиц в структуру изделий. Увеличение размера крошки в образце 1 до 1,5–2,0 мм предположительно обусловлено присутствием частиц отрубей и жмыха.

Комплексный анализ рецептур и показателей качества представлен в таблице 3.

По результатам собственных исследований энергетическая ценность опытных образцов составила 405–412 ккал/100 г против 458 ккал/100 г в контроле. Образец 1 отличается включением дополнительных источников пищевых волокон. В рецептуре образца 2 отсутствует глютенсодержащее сырьё; полученное в работе значение гликемического индекса составило 45 ± 3. Значимость контроля данного показателя для рисового печенья согласуется с исследованием C.L. Pereira и соавторов, в котором состав мучной основы и внесение рисовых отрубей влияли на расчётный гликемический индекс и переваримость крахмала [6, с. 8–10].

Таблица 3. Комплексный анализ рецептур исследуемых образцов печенья

Критерий	Контроль	Опыт 1	Опыт 2
Энергетическая ценность, ккал/100 г	458 ± 15	412 ± 12	405 ± 12
Гликемический индекс (ГИ), усл. ед.	75 ± 3	58 ± 3	45 ± 3

Критерий	Контроль	Опыт 1	Опыт 2
Аллергенность	Высокая (глютен, яйца, молоко, орехи)	Средняя (глютен, кунжут)	Низкая (без пшеницы, яиц и молока)
Технологичность	Простая, проверенная	Сложнее - требуется контроль соотношения аквафабы	Сложнее - требуется контроль гидратации мучной смеси
Экономическая эффективность	Средняя	Высокая-замена масла и меланжа вторичным сырьём	Средняя-рисовая и кукурузная мука дороже пшеничной
Целевая аудитория	Массовый потребитель	Частично ограниченная (здоровое питание)	Специализированная (целиакия, аллергия, веганство)

Обозначение образца 2 как безглютенового продукта требует подтверждения содержания глютена не более 20 мг/кг готового изделия в соответствии с CXS 118 – 1979 [7, с. 2]. Стандарт также предусматривает предотвращение загрязнения глютеном при производстве и применение соответствующих аналитических методов контроля [7, с. 2–3].

Разработанные рецептуры печенья № 137 ЭКО «Анти-Аллерджи» (опыт 1) и № 137 гипоаллергенного (безглютенового) «Южное» (опыт 2) приведены в таблице 4. Количество масла в них сохранено на уровне базовой рецептуры (26,25 кг), что превышает изученный при моделировании диапазон и требует проверки моделей в расширенном диапазоне.

Таблица 4. Сводные рецептуры печенья (расход сырья на загрузку, кг)

Наименование сырья	СВ*, %	Опыт 1		Опыт 2	
		в натуре	в СВ	в натуре	в СВ
Мука пшеничная 2 сорт и отруби	85,6	100,00	85,50	-	-
Мука рисовая и кукурузная	88,45	-	-	100,00	88,10
Сахарная пудра	99,85	33,40	33,35	33,40	33,35
Масло кунжутное	100,0	26,25	26,25	-	-
Масло подсолнечное	100,0	-	-	26,25	26,25
Аквафаба (отвар нута)	8,0	11,25	0,90	11,25	0,90
Яблочный жмых	90,0	13,40	12,06	-	-
Шрот подсолнечный	92,0	15,00	13,80	-	-
Изюм натуральный (без SO_2)	74,0	-	-	22,10	16,40
Семена подсолнечника	93,0	-	-	16,60	15,40
Соль поваренная пищевая	96,5	0,55	0,53	0,55	0,53
Натрий двууглекислый	50,0	0,68	0,34	0,68	0,34
Аммоний углекислый	-	1,11	-	1,11	-
Итого	-	**201,64**	**172,73**	**211,94**	**181,27**

**Примечание: СВ – сухие вещества*

Заключение

В результате математического моделирования и многокритериальной оптимизации определён компромиссный оптимум рецептурных факторов: X_1=+0,15, X_2=+0,81, X_3=+1,00 при значении функции желательности D=0,71. Полученные модели позволили установить рациональное сочетание аквафабы, растительного масла и волокнистых компонентов, обеспечивающее требуемые технологические и органолептические свойства печенья.

Разработанные образцы соответствовали требованиям ГОСТ 24901–2023 по основным нормируемым показателям. Содержание жира снизилось до 14,0–14,5 % против 18,2 % в контроле, энергетическая ценность — до 405–412 ккал/100 г против 458 ккал/100 г. Дегустационная оценка составила 4,2–4,4 балла. Полученные результаты подтверждают перспективность использования растительных компонентов при разработке печенья с пониженным аллергенным потенциалом и сниженной энергетической ценностью.

Список литературы

1. ГОСТ 24901–2023. Печенье. Общие технические условия. – М.: Российский институт стандартизации, 2023. – 17 с.
2. Кузьмина С.С., Козубаева Л.А., Егорова Е.Ю. Управление реологическими свойствами теста для обеспечения качества безглютенового печенья // Ползуновский вестник. – 2023. – № 2. – С. 60–66. – DOI: 10.25712/ASTU.2072–8921.2023.02.008.
3. О мерах по повышению качества профилактики и лечения аллергических заболеваний: постановление Президента Республики Узбекистан от 23.11. № ПП-371 // LexUZ: Национальная база данных законодательства Республики Узбекистан. – 2023. – № 6673875.
4. ТР ТС 022/2011. Пищевая продукция в части ее маркировки: технический регламент Таможенного союза: утв. Решением Комиссии Таможенного союза от 09.12.2011 г. № 881 (ред. от 22.04.2024).
5. Box G.E.P., Behnken D.W. Some new three level designs for the study of quantitative variables // Technometrics. – 1960. – Т. 2, № 4. – P. 455–475. – DOI: 10.1080/00401706.1960.10489912.
6. C.L. Pereira, I. Sousa, C. Roseiro [et al.]. Development and evaluation of gluten-free rice biscuits: impact on glycaemic index and bioactive compounds // Foods. – 2025. – Т. 14, № 13. – Art. 2276. – DOI: 10.3390/foods14132276.
7. Codex Alimentarius. Standard for Foods for Special Dietary Use for Persons Intolerant to Gluten: CXS 118–1979. – Revised 2008; amended 1983. – Rome: FAO/WHO, 2015. – 3 P.
8. Harrington E.C. The desirability function // Industrial Quality Control. – 1965. – Т. 21, № 10. – P. 494–498.
9. M. Usman, S. Ahmed, A. Mehmood [et al.]. Effect of apple pomace on nutrition, rheology of dough and cookies quality // Journal of Food Science and Technology. – 2020. – Т. 57, № 9. – P. 3244–3251. – DOI: 10.1007/s13197-020-04355-z.

10. Stasiak J., Stasiak D.M., Libera J. The potential of aquafaba as a structure-shaping additive in plant-derived food technology // Applied Sciences. – 2023. – T. 13, № 7. – Art. 4122. – DOI: 10.3390/app13074122.
11. Sudha M.L., Baskaran V., Leelavathi K. Apple pomace as a source of dietary fiber and polyphenols and its effect on the rheological characteristics and cake making // Food Chemistry. – 2007. – T. 104, № 2. – P. 686–692. – DOI: 10.1016/j.foodchem.2006.12.016.

References

1. GOST 24901 Pechen'e. Obshchie tekhnicheskie usloviya [Biscuits. General specifications]. Moscow: Russian Institute for Standardization, 2023. – Moscow: Russian Institute for Standardization, 2023. – 17 P. (In Russ.).
2. Kuzmina S.S., Kozubaeva L.A., Egorova E.Yu. [Control of rheological properties of the dough to ensure the quality of gluten-free cookies] // Polzunovskiy vestnik. – 2023. – No. 2. – P. 60–66. – DOI: 10.25712/ASTU.2072–8921.2023.02.008. (In Russ.).
3. O merakh po povysheniyu kachestva profilaktiki i lecheniya allergicheskikh zabolevaniy [On measures to improve the quality of prevention and treatment of allergic diseases]: Resolution of the President of the Republic of Uzbekistan dated 23.11.2023. № PP-371 // LexUZ: National Database of Legislation of the Republic of Uzbekistan. Document. – 2023. – No. 6673875. (In Russ.).
4. TR TS 022/2011. Pishchevaya produktsiya v chasti ee markirovki [Food products in terms of their labelling]: Technical Regulation of the Customs Union, approved by Decision of the Customs Union Commission dated 09.12.2011 No. 881 (as amended on 22.04.2024). (In Russ.).
5. Box G.E.P., Behnken D.W. Some new three level designs for the study of quantitative variables // Technometrics. – 1960. – Vol. 2, No. 4. – P. 455–475. – DOI: 10.1080/00401706.1960.10489912.
6. C.L. Pereira, I. Sousa, C. Roseiro [et al.]. Development and evaluation of gluten-free rice biscuits: impact on glycaemic index and bioactive compounds // Foods. – 2025. – Vol. 14, No. 13. – Art. 2276. – DOI: 10.3390/foods14132276.
7. Codex Alimentarius. Standard for Foods for Special Dietary Use for Persons Intolerant to Gluten: CXS 118–1979. Revised 2008; amended 1983. – Rome: FAO/WHO, 2015. – 3 P.
8. Harrington E.C. The desirability function // Industrial Quality Control. – 1965. – Vol. 21, No. 10. – P. 494–498.
9. M. Usman, S. Ahmed, A. Mehmood [et al.]. Effect of apple pomace on nutrition, rheology of dough and cookies quality // Journal of Food Science and Technology. – 2020. – Vol. 57, No. 9. – P. 3244–3251. – DOI: 10.1007/s13197-020-04355-z.
10. Stasiak J., Stasiak D.M., Libera J. The potential of aquafaba as a structure-shaping additive in plant-derived food technology // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13, No. 7. – Art. 4122. – DOI: 10.3390/app13074122.

11. Sudha M.L., Baskaran V., Leelavathi K. Apple pomace as a source of dietary fiber and polyphenols and its effect on the rheological characteristics and cake making // Food Chemistry. – 2007. – Vol. 104, No. 2. – P. 686–692. – DOI: 10.1016/j.foodchem.2006.12.016.

Статья поступила в редакцию: 01.10.2026
Статья принята к публикации: 12.10.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 664.68:664.644.5

DOI: 10.32743/UniTech.2026.151.10.23539

Влияние растительной композиции на структуру и показатели сохраняемости заварного кондитерского крема

Курбанова Шахноза Муродовна
докторант
Бухарский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Бухара
E-mail: shakhnoz_kurbanova@mail.ru

Effect of a herbal blend on the structure and storage-related quality of custard confectionery cream

Kurbanova Shakhnoza Murodovna
Doctoral student
Bukhara State Technical University
Uzbekistan, Bukhara

Аннотация

В работе рассмотрено, как порошки трёх лекарственных растений – мелиссы лекарственной, мать-и-мачехи и зверобоя продырявленного – изменяют технологические свойства заварного кондитерского крема, и проведено сравнение действия каждого компонента в отдельности с действием их смеси. Объектами служили контрольный крем, три образца с одним из растительных порошков и образец с комплексной растительной добавкой. Во всех образцах определяли органолептические показатели, влажность, синерезис и перекисное число; для крема с комплексной добавкой дополнительно измеряли активность воды и количество мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов (КМАФАнМ). Спустя 24 ч наименьшее отделение жидкой фазы зафиксировано у крема с мать-и-мачехой: синерезис составил 0,8 % при 4,2 % у контроля. Порошок мелиссы позволил получить самое низкое перекисное число (0,12 ммоль/кг; в контроле – 0,45 ммоль/кг) и обеспечил лучшую органолептическую оценку среди опытных вариантов. Наиболее выраженный антимикробный эффект был характерен для зверобоя, но эта добавка ухудшала вкус продукта. В креме со смесью порошков (1:1:1) на 96-й час хранения активность воды равнялась 0,88 (контроль – 0,94), а КМАФАнМ – $2{,}1\times10^{3}$ КОЕ/г (контроль – $5{,}4\times10^{5}$ КОЕ/г). Совместное применение изученных порошков можно рассматривать как способ управления

Библиографическое описание: Курбанова Ш.М. Влияние растительной композиции на структуру и показатели сохраняемости заварного кондитерского крема // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23539

структурными, окислительными и микробиологическими характеристиками заварного крема. Полученные данные применимы при корректировке рецептуры и подготовке технологической документации на кондитерскую продукцию с растительными ингредиентами.

Abstract

This study examines how powders of three medicinal plants – lemon balm (Melissa officinalis L.), coltsfoot (Tussilago farfara L.) and St. John’s wort (Hypericum perforatum L.) – alter the technological properties of custard confectionery cream, and compares the action of each ingredient alone with that of their blend. The samples included a control cream, three creams each containing one plant powder, and a cream with a combined plant additive. Sensory properties, moisture content, syneresis and peroxide value were measured in all samples; for the cream with the combined additive, water activity and the count of mesophilic aerobic and facultative anaerobic microorganisms were also determined. After 24 h, the least liquid separation was recorded for the cream with coltsfoot, whose syneresis was 0.8 % against 4.2 % in the control. Lemon balm powder yielded the lowest peroxide value (0.12 mmol/kg; control, 0.45 mmol/kg) and the best sensory score among the experimental variants. St. John’s wort had the strongest antimicrobial effect but impaired the taste of the product. In the cream with the powder blend (1:1:1), water activity at 96 h of storage was 0.88 (control, 0.94), and the microbial count was 2.1×10^3 CFU/g (control, 5.4×10^5 CFU/g). The combined use of the studied powders can be regarded as a means of controlling the structural, oxidative and microbiological characteristics of custard cream. The data are applicable to adjusting formulations and preparing technological documentation for confectionery products with plant ingredients.

Ключевые слова: заварной кондитерский крем, мелисса лекарственная, мать-и-мачеха, зверобой продырявленный, растительные порошки, синерезис, микробиологическая стабильность.

Keywords: custard confectionery cream, lemon balm, coltsfoot, St. John’s wort, plant powders, syneresis, microbiological stability.

Введение

При хранении заварного кондитерского крема одновременно протекают структурные, окислительные и микробиологические изменения, которые в совокупности и определяют его качество. Миграция влаги и выделение жидкой фазы нарушают консистенцию, окислительные превращения липидов отражаются на вкусе и аромате, а высокая активность воды благоприятствует росту микрофлоры. Корректировка рецептуры способна уменьшить активность воды и замедлить часть процессов порчи, однако данные, полученные на кремах иного типа, нельзя прямо переносить на заварной крем, поскольку он отличается и составом, и технологией приготовления [7, с. 24–26; 6, с. 15–19].

Интерес к растительному сырью обусловлен тем, что содержащиеся в нём соединения могут одновременно воздействовать на органолептические свойства, антиоксидантный статус и микробиологическую стабильность пищевых систем. Применительно к мелиссе лекарственной установлено, что антирадикальная и антимикробная активность её эфирного

масла определяется компонентным составом [1, с. 188–196], а в обзорных работах обсуждаются возможности использования Melissa officinalis в пищевых продуктах [8, с. 1–11]. Антимикробное действие зверобоя продырявленного зависит от концентрации экстракта и способа его получения, вследствие чего результаты, полученные вне пищевой матрицы, следует интерпретировать с осторожностью [5, с. 186–194].

Задача настоящей работы состояла в сравнительной оценке влияния порошков мелиссы, мать-и-мачехи, зверобоя и их смеси на структурные, окислительные и органолептические характеристики заварного крема.

Материалы и методы

В эксперименте использовали контрольный крем, три опытных образца, в каждый из которых вносили порошок одного растения (Melissa officinalis L., Tussilago farfara L. или Hypericum perforatum L.), а также образец с комплексной растительной добавкой (КРД). КРД представляла собой смесь трёх порошков в равных долях (1:1:1) и вводилась в количестве 3,0 % от массы муки.

Органолептическую оценку проводили по пятибалльной шкале; кроме того, определяли влажность (%), синерезис (%) и перекисное число (ммоль/кг). В серии с КРД дополнительно измеряли активность воды (aw) и КМАФАнМ (КОЕ/г). Требования к отбору проб и к определению КМАФАнМ установлены ГОСТ 31904–2012 и ГОСТ 10444.15–94 соответственно [4, с. 4–5; 2, с. 3–5].

Образцы с отдельными порошками сопоставляли по результатам через 24 ч хранения, тогда как крем с КРД наблюдали в течение 96 ч. Данные двух серий рассматривали независимо и в общий временной ряд не сводили.

Результаты и обсуждение

Влажность использованных растительных порошков находилась в пределах 7,8–9,2 %, дисперсность – 88–95 %. Флавоноиды содержались в количестве 275 ± 35 мг/100 г в мелиссе, 200 ± 20 мг/100 г в мать-и-мачехе и 525 ± 75 мг/100 г в зверобое. Порошок мать-и-мачехи отличался самой высокой водоудерживающей способностью – 5,4 ± 0,3 г/г. С учётом этих свойств растительное сырьё можно считать фактором, воздействующим на распределение влаги и дисперсную структуру крема.

Таблица 1. Показатели заварного крема через 24 ч хранения

Показатель	Значение показателя			
	Контроль	**Мелисса**	**Мать-и-мачеха**	**Зверобой**
Сенсорная оценка, балл	4,80	4,85	4,77	4,47
Влажность, %	40,4 ± 0,3	41,8 ± 0,3	41,2 ± 0,2	41,5 ± 0,3
Синерезис, %	4,2 ± 0,2	2,8 ± 0,2	0,8 ± 0,1	3,1 ± 0,2
Перекисное число, ммоль/кг	0,45 ± 0,02	0,12 ± 0,01	0,38 ± 0,02	0,18 ± 0,01

По данным таблицы 1, внесение мать-и-мачехи уменьшило синерезис через 24 ч с 4,2 до 0,8 %, т. е. на 3,4 процентного пункта. Такой результат соответствует высокой водоудерживающей способности порошка, однако механизм его действия может быть подтверждён лишь при изучении микроструктуры.

Среди опытных образцов крем с мелиссой получил наивысшую органолептическую оценку – 4,85 балла, а его перекисное число снизилось с 0,45 до 0,12 ммоль/кг (на 73,3 %). В образце со зверобоем перекисное число составило 0,18 ммоль/кг, но органолептическая оценка уменьшилась до 4,47 балла.

Сведения из литературы указывают на то, что биологическую активность растительного сырья следует отличать от его действия в составе конкретного пищевого продукта. Так, разбавленные экстракты зверобоя могли не подавлять исследованные микроорганизмы, в то время как концентрированные проявляли активность в отношении отдельных штаммов Staphylococcus aureus [5, с. 186–194]. Состав эфирного масла мелиссы и степень его активности также определяются исходным сырьём и условиями выделения [1, с. 188–196].

Таблица 2. Сравнение контрольного и опытного крема в наблюдении до 96 ч

Показатель	**Контроль**	**КРД (1:1:1; 3,0 % к массе муки)**
Активность воды, aw	0,94	0,88
Перекисное число, ммоль/кг	0,45 ± 0,02	0,18 ± 0,01
КМАФАнМ, КОЕ/г	$5{,}4\times10^{5}$	$2{,}1\times10^{3}$
Сенсорная оценка, балл	4,8 ± 0,2	4,9 ± 0,1

Как видно из таблицы 2, к 96 ч хранения активность воды крема с КРД была равна 0,88 (в контроле – 0,94), а КМАФАнМ – $2{,}1\times10^{3}$ КОЕ/г против $5{,}4\times10^{5}$ КОЕ/г, т. е. приблизительно в 257 раз ниже. Показатель КМАФАнМ не может заменить контроль санитарно-показательных и патогенных микроорганизмов; порядок определения колиформных бактерий установлен ГОСТ 31747–2012 [3, с. 2–6]. По этой причине срок 96 ч следует рассматривать как продолжительность наблюдения, а не как установленный срок годности.

Целесообразность объединения трёх растений в одной добавке объясняется тем, что их эффекты различаются: с мелиссой были связаны пониженное перекисное число и высокая органолептическая оценка, с мать-и-мачехой – наименьший синерезис, со зверобоем – снижение перекисного числа на фоне менее удачной органолептической оценки. Вместе с тем говорить о синергизме на основании полученных данных преждевременно: для этого требуются опыты, в которых отдельные компоненты и смеси вносятся в одинаковой суммарной дозе, достаточное число повторностей и статистическая проверка взаимодействий.

Отдельного внимания требует безопасность мать-и-мачехи: поскольку содержание пирролизидиновых алкалоидов в ней непостоянно, каждую партию сырья необходимо идентифицировать и проверять количественно [11, с. 1–17; 9, с. 1–34].

Для практического применения рецептуры следует закрепить фактическую дозировку добавки, температуру её внесения, тип упаковки и режим хранения. Подтверждение сохраняемости требует испытаний на независимых партиях с микробиологическим контролем в начале и в конце хранения, а также с оценкой показателей безопасности. Данные

литературы о мелиссе и других растительных ингредиентах свидетельствуют о перспективности выбранного направления, однако не могут заменить экспериментальной проверки в той пищевой системе, для которой разрабатывается рецептура [8, с. 1–11; 10, с. 1–12].

Заключение

Наименьший синерезис обеспечило внесение мать-и-мачехи, а наименьшее перекисное число при высокой органолептической оценке – внесение мелиссы; зверобой снижал перекисное число, но по органолептическим показателям уступал другим вариантам. В креме с КРД (1:1:1) на 96-й час хранения активность воды и КМАФАнМ оставались ниже, чем в контроле. Растительная композиция представляется перспективной для регулирования качества заварного крема, однако её применение необходимо подкрепить данными о воспроизводимости результатов и безопасности.

Список литературы

1. А.А. Ефремов, Е.Е. Савельева, Н.А. Булгакова, Т.В. Рукосуева, В.А. Волкова. Компонентный состав, антирадикальная и антимикробная активность эфирного масла листьев мелиссы лекарственной // Химия растительного сырья. – 2025. – № 1. – С. 188–196. – DOI: 10.14258/jcprm.20250115329.
2. ГОСТ 10444.15–94. Продукты пищевые. Методы определения количества мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов. – С. 3–5.
3. ГОСТ 31747–2012. Продукты пищевые. Методы выявления и определения количества бактерий группы кишечных палочек (колиформных бактерий). – С. 2–6.
4. ГОСТ 31904–2012. Продукты пищевые. Методы отбора проб для микробиологических испытаний. – С. 4–5.
5. Ефремов А.А., Савельева Е.Е., Булгакова Н.А. Компонентный состав, антирадикальная и антимикробная активность экстрактов зверобоя продырявленного Красноярского края // Химия растительного сырья. – 2025. – № 4. – С. 186–194. – DOI: 10.14258/jcprm. 20250416616.
6. Курбанова Ш.М., Атамуратова Т.И. Кондитерские кремы и кексы как объекты с повышенным риском порчи: обзор микробиологических, окислительных и структурных механизмов деградации // Universum: технические науки. – 2026. – № 4 (145). – С. 15–19. – DOI: 10.32743/UniTech.2026.145.4.22461.
7. Т.Г. Богатырева, Н.В. Рубан, В.А. Васькина, И.Г. Белявская. Белок-полисахаридные смеси для увеличения продолжительности хранения масляных кремов // Пищевая промышленность. – 2015. – № 3. – С. 24–26.
8. Carvalho F., Duarte A.P., Ferreira S. Antimicrobial activity of Melissa officinalis and its potential use in food preservation // Food Bioscience. – 2021. – Т. 44. – Art. 101437. – P. 1–11. – DOI: 10.1016/j.fbio.2021.101437.

9. H.K. Knutsen, J. Alexander, L. Barregard [et al.]. Risks for human health related to the presence of pyrrolizidine alkaloids in honey, tea, herbal infusions and food supplements // EFSA Journal. – 2017. – T. 15, № 7. – Art. 4908. – P. 1–34. – DOI: 10.2903/j.efsa.2017.4908.
10. R.M. Spréa, C. Caleja, J. Pinela [et al.]. Comparative study on the phenolic composition and in vitro bioactivity of medicinal and aromatic plants from the Lamiaceae family // Food Research International. – 2022. – T. 161. – Art. 111875. – P. 1–12. – DOI: 10.1016/j.foodres.2022.111875.
11. S. Chen, L. Dong, H. Quan [et al.]. A review of the ethnobotanical value, phytochemistry, pharmacology, toxicity and quality control of Tussilago farfara L. (coltsfoot) // Journal of Ethnopharmacology. – 2021. – T. 267. – Art. 113478. – P. 1–17. – DOI: 10.1016/j.jep. 2020.113478.

References

1. A.A. Efremov, E.E. Savel. Komponentnyy sostav, antiradikal'naya i antimikrobnaya aktivnost' efirnogo masla list'yev melissy lekarstvennoy [Component composition, antiradical and antimicrobial activity of the essential oil of lemon balm (Melissa officinalis) leaves] // Khimiya rastitel'nogo syr'ya. – 2025. – No. 1. – P. 188–196. – DOI: 10.14258/jcprm.20250115329. (In Russ.).
2. GOST 10444.15–94. Produkty pishchevye. Metody opredeleniya kolichestva mezofil'nykh aerobnykh i fakul'tativno-anaerobnykh mikroorganizmov [Food products. Methods for determination of quantity of mesophilic aerobes and facultative anaerobes]. P. 3–5. – 1994. (In Russ.).
3. GOST 31747 Produkty pishchevye. Metody vyyavleniya i opredeleniya kolichestva bakteriy gruppy kishechnykh palochek (koliformnykh bakteriy) [Food products. Methods for detection and quantity determination of coliform bacteria]. P. 2–6. – 2012. (In Russ.).
4. GOST 31904 Produkty pishchevye. Metody otbora prob dlya mikrobiologicheskikh ispytaniy [Food products. Sampling methods for microbiological tests]. P. 4–5. – 2012. (In Russ.).
5. Efremov A.A., Savel'yeva E.E., Bulgakova N.A. Komponentnyy sostav, antiradikal'naya i antimikrobnaya aktivnost' ekstraktov zveroboya prodyryavlennogo Krasnoyarskogo kraya [Component composition, antiradical and antimicrobial activity of extracts of St. John's wort (Hypericum perforatum) from the Krasnoyarsk Territory] // Khimiya rastitel'nogo syr'ya. – 2025. – No. 4. – P. 186–194. – DOI: 10.14258/jcprm.20250416616. (In Russ.).
6. Kurbanova Sh.M., Atamuratova T.I. Konditerskie kremy i keksy kak ob''ekty s povyshennym riskom porchi: obzor mikrobiologicheskikh, okislitel'nykh i strukturnykh mekhanizmov degradatsii [Confectionery creams and cupcakes as products with an increased risk of spoilage: a review of microbiological, oxidative and structural degradation mechanisms] // Universum: tekhnicheskie nauki. – 2026. – No. 4 (145). – P. 15–19. – DOI: 10.32743/UniTech. 2026.145.4.22461. (In Russ.).
7. T.G. Bogatyreva, N.V. Ruban, V.A. Vas. Belok-polisakharidnye smesi dlya uvelicheniya prodolzhitel'nosti khraneniya maslyanykh kremov [Protein-polysaccharide mixtures for extending the shelf life of butter creams] // Pishchevaya promyshlennost'. – 2015. – No. 3. – P. 24–26. (In Russ.).

8. Carvalho F., Duarte A.P., Ferreira S. Antimicrobial activity of Melissa officinalis and its potential use in food preservation // Food Bioscience. – 2021. – Vol. 44. – Art. 101437. – P. 1–11. – DOI: 10.1016/j.fbio.2021.101437.
9. H.K. Knutsen, J. Alexander, L. Barregard [et al.]. Risks for human health related to the presence of pyrrolizidine alkaloids in honey, tea, herbal infusions and food supplements // EFSA Journal. – 2017. – Vol. 15, No. 7. – Art. 4908. – P. 1–34. – DOI: 10.2903/j.efsa.2017.4908.
10. R.M. Spréa, C. Caleja, J. Pinela [et al.]. Comparative study on the phenolic composition and in vitro bioactivity of medicinal and aromatic plants from the Lamiaceae family // Food Research International. – 2022. – Vol. 161. – Art. 111875. – P. 1–12. – DOI: 10.1016/j.foodres.2022.111875.
11. S. Chen, L. Dong, H. Quan [et al.]. A review of the ethnobotanical value, phytochemistry, pharmacology, toxicity and quality control of Tussilago farfara L. (coltsfoot) // Journal of Ethnopharmacology. – 2021. – Vol. 267. – Art. 113478. – P. 1–17. – DOI: 10.1016/j.jep.2020.113478.

Статья поступила в редакцию: 01.10.2026
Статья принята к публикации: 08.10.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 66.061+664.8

DOI: 10.32743/UniTech.2026.151.10.23548

Исследование и интенсификация процесса водной экстракции из вторичного сырья, образующегося после отжима сока из плодов граната (*Punica Granatum* L.)

Мамажонов Азаматилло Бахтиёр ўғли
магистрант
Ташкентский фармацевтический институт
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: azamatillomamajonov@gmail.com
Ахмедов Анвар Джабаралиевич
базовый докторант (PhD)
Институт химии растительных веществ АН РУз
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Мамадалиева Нилуфар Зокиржоновна
д-р техн. наук, проф.
Институт химии растительных веществ АН РУз
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Хажибаев Темурбек Атаханович
PhD по техническим наукам
Институт химии растительных веществ АН РУз
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Абдурахманов Бахтияр Алимович
PhD по техн. наукам
Институт химии растительных веществ АН РУз
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Маматханов Ахматхон Умарханович
д-р техн. наук, проф.
Институт химии растительных веществ АН РУз
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Халилов Равшанжон Муратджанович
д-р техн. наук, проф.
Институт химии растительных веществ АН РУз
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Библиографическое описание: Исследование и интенсификация процесса водной экстракции из вторичного сырья, образующегося после отжима сока из плодов граната (Punica Granatum L.) // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Мамажонов А.Б.Ў. [и др.]. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23548

Investigation and intensification of the aqueous extraction process from secondary raw materials generated after juice pressing of pomegranate fruits (*Punica Granatum* L.)

Mamajonov Azamatullo
Master's student, Tashkent Pharmaceutical Institute
Republic of Uzbekistan, Tashkent
Akhmedov Anvar
PhD candidate
Institute of the Chemistry of Plant Substances
Republic of Uzbekistan, Tashkent
Mamadalieva Nilufar
doctor of Sciences, Professor
Institute of Chemistry of Plant Substances
Republic of Uzbekistan, Tashkent
Khajibaev Temurbek
PhD
in Technical Sciences Institute of Chemistry of Plant Substances
Republic of Uzbekistan, Tashkent
Abdurakhmanov Bakhtiyar
PhD
in Technical Sciences Institute of Chemistry of Plant Substances
Republic of Uzbekistan, Tashkent
Mamatkhanov Akhmatkhon
doctor of Technical Sciences, Professor
Institute of Chemistry of Plant Substances
Republic of Uzbekistan, Tashkent
Khalilov Ravshanjon
doctor of Technical Sciences, Professor
Institute of Chemistry of Plant Substances
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

Целью исследования являлось установление рациональных условий и интенсификация процесса водной экстракции из вторичного сырья плодов граната (*Punica granatum* L.), образующегося после отжима сока, для последующего получения сухого экстракта. В качестве исходного сырья использовали вторичное сырье граната, предварительно высушенное до остаточной влажности 7–8 % и разделенное на семена и кожуру. Проведено сравнительное изучение трех способов водной экстракции: ремацерации, принудительной циркуляции экстрагента и перемешивания. Установлено, что выход экстрактивных веществ составил 19,09; 25,41 и 25,80 % соответственно. Метод принудительной циркуляции обеспечивал близкий к максимальному выход экстрактивных веществ при общем гидромодуле 1:14, тогда как при перемешивании общий гидромодуль составлял 1:26. Для установления рациональных условий экстракции методом принудительной циркуляции использовали план латинских квадратов 3×3 с изучением влияния соотношения сырья и экстрагента, скорости циркуляции и степени измельченности сырья. Дополнительно изучена динамика процесса при последовательной экстракции. Установлено, что рациональная продолжительность первой экстракции составляет 300 мин, второй и третьей — по 180 мин. Суммарный выход экстрактивных веществ при трехкратной экстракции составил 25,6 %.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности интенсификации процесса водной экстракции путем применения принудительной циркуляции экстрагента и могут быть использованы при дальнейшей разработке технологии получения сухого экстракта из вторичного сырья плодов граната.

Abstract

The aim of the study was to establish rational conditions and intensify the aqueous extraction process from secondary raw materials of pomegranate fruits (*Punica granatum* L.) generated after juice pressing for the subsequent production of a dry extract. The secondary pomegranate raw material was preliminarily dried to a residual moisture content of 7–8 % and separated into seeds and peel. A comparative study of three aqueous extraction methods was carried out: remaceration, forced circulation of the extracting agent, and stirring. The yields of extractive substances were found to be 19.09, 25.41, and 25.80 %, respectively. Forced circulation provided a yield of extractive substances close to the maximum at a total hydromodule of 1:14, whereas the total hydromodule for stirring was 1:26. A 3×3 Latin square experimental design was used to establish rational extraction conditions by forced circulation, with the effects of the raw material-to-extractant ratio, circulation rate, and degree of raw material comminution studied. The extraction dynamics during sequential extraction were additionally investigated. The rational extraction time was established as 300 min for the first extraction and 180 min for each of the second and third extractions. The total yield of extractive substances after three successive extractions was 25.6 %. The results demonstrate the possibility of intensifying the aqueous extraction process by applying forced circulation of the extracting agent and can be used for further development of the technology for producing a dry extract from secondary raw materials of pomegranate fruits.

Ключевые слова: Punica granatum L, вторичное сырье, плоды граната, экстракция, оптимизация процесса.

Keywords: Punica granatum L, secondary raw materials, pomegranate fruits, aqueous extraction, process intensification, forced circulation, dry extract.

Введение

Современная перерабатывающая промышленность ориентирована не только на повышение эффективности использования растительного сырья, но и на рациональное вовлечение в технологический процесс вторичных ресурсов, образующихся при производстве пищевой продукции. Особый интерес представляют растительные побочные продукты, содержащие биологически активные соединения и потенциально пригодные для получения экстрактов и других продуктов с добавленной стоимостью [6, 9, 10].

Гранат (*Punica granatum* L.) является ценным плодовым растением, широко используемым для производства соков и других продуктов переработки. При промышленном отжиме сока образуется значительное количество вторичного сырья, представленного преимущественно кожурой и семенами плодов. Данные части плода содержат полифенольные соединения, дубильные вещества, флавоноиды, органические кислоты и другие биологически активные компоненты, что обусловливает перспективность их

дальнейшего технологического использования [6, 9, 10]. Вовлечение данного сырья в переработку позволяет повысить степень использования растительных ресурсов и расширить сырьевую базу для получения растительных экстрактов.

Кожура граната рассматривается как богатый источник фенольных соединений, включая эллаготанины, флавоноиды и другие компоненты полифенольного комплекса [10,8]. Исследования также показывают перспективность использования гранатовых побочных продуктов в качестве источников ценных соединений для пищевой и других отраслей промышленности [6,9]. В связи с этим вторичное сырье, образующееся после отжима сока из плодов граната, представляет интерес как объект для разработки технологии получения экстрактивных веществ с последующим получением сухого экстракта.

Одним из основных этапов разработки технологии получения растительных экстрактов является выбор рационального способа извлечения целевых компонентов. Эффективность экстракции зависит от природы экстрагента, соотношения сырья и экстрагента, температуры, продолжительности процесса, степени измельчения сырья и интенсивности массообмена [6,8]. В литературе описан широкий спектр традиционных и интенсифицированных методов экстракции биологически активных соединений из побочных продуктов граната, включая мацерацию, экстракцию при перемешивании, ультразвуковую и другие методы [6,8].

При разработке технологического процесса получения растительных экстрактов особое значение имеют методы, отличающиеся простотой аппаратурного оформления, возможностью масштабирования и использованием безопасных экстрагентов. В этом отношении представляет интерес водная экстракция, позволяющая получать экстракты без применения органических растворителей. Вместе с тем эффективность водного извлечения определяется условиями контакта растительного сырья с экстрагентом и интенсивностью массообменных процессов. Поэтому повышение интенсивности перемещения экстрагента в экстракционной системе может рассматриваться как один из путей интенсификации процесса [8].

Применение принудительной циркуляции экстрагента обеспечивает постоянное перемещение жидкой фазы через слой растительного сырья и способствует интенсификации массообмена между сырьем и экстрагентом. При этом рациональный выбор соотношения сырья и экстрагента, скорости циркуляции и степени измельчения сырья позволяет регулировать эффективность извлечения и продолжительность технологического процесса. Установление взаимосвязи между указанными параметрами представляет практический интерес при разработке технологии переработки вторичного сырья плодов граната.

Для получения удобной для хранения, транспортирования и дальнейшего технологического использования формы жидкий экстракт может быть переведен в сухое состояние. Распылительная сушка является распространенным способом получения сухих растительных экстрактов, позволяющим быстро удалять влагу из диспергированного раствора и получать порошкообразный продукт. Эффективность данного процесса зависит от характеристик исходного экстракта и параметров сушки. Поэтому разработка технологии получения сухого экстракта должна рассматриваться как последовательность взаимосвязанных технологических стадий, начиная с подготовки вторичного сырья и выбора рациональных условий экстракции.

Для установления рациональных условий технологических процессов применение методов математического планирования эксперимента позволяет одновременно оценивать влияние нескольких факторов и получать необходимую информацию при ограниченном числе опытов. Такой подход представляет интерес и при исследовании процессов экстракции растительного сырья, где выход экстрактивных веществ зависит от совокупного действия нескольких технологических параметров [8].

Несмотря на значительное количество исследований, посвященных химическому составу и потенциальному использованию кожуры и других побочных продуктов граната, вопросы разработки технологически обоснованного процесса водной экстракции вторичного сырья, образующегося непосредственно после отжима сока и содержащего смесь кожуры и семян, требуют дальнейшего изучения [6, 8–10]. В частности, представляет интерес сравнительное исследование различных способов экстракции, установление рациональных параметров принудительной циркуляции экстрагента и изучение динамики последовательного извлечения экстрактивных веществ.

Целью исследования: Установление рациональных условий и интенсификация процесса водной экстракции вторичного сырья, образующегося после отжима сока из плодов граната (*Punica granatum* L.), путем сравнительного изучения способов экстракции, математического планирования эксперимента и исследования динамики последовательного извлечения экстрактивных веществ.

Экспериментальная часть

В качестве исходного сырья для проведения исследований использовали вторичное сырье, образующееся после отжима сока из плодов граната (*Punica granatum* L.), относящегося к семейству Lythraceae. Сырье было получено непосредственно от производителей гранатового сока в Узбекистане.

Товароведческий анализ исходного сырья проводили с целью определения его основных качественных и количественных характеристик, а также выхода отдельных морфологических частей, используемых в последующих экспериментальных исследованиях.

Полученное вторичное сырье предварительно измельчали с помощью ножа или топора до размеров около 5,0 см в длину и 1,0 см в ширину. Затем измельченное сырье сушили в установке с принудительной циркуляцией горячего воздуха при температуре 60 ± 5 °C до достижения влажности 7–8 %.

После сушки сырье вручную разделяли на семена и кожуру. При этом особое внимание уделяли максимально полному удалению остатков кожуры с поверхности семян. Выделенные фракции взвешивали отдельно и определяли их массу и выход по отношению к исходной массе сырья.

Выход отдельных фракций рассчитывали по формуле:

$$X = \frac{m_1}{m_0} \bullet 100 ; \quad (1)$$

где X — выход фракции, %; m_1 — масса выделенной фракции, кг; m_0 — масса исходного сырья, кг.

Из 5,0 кг свежего вторичного сырья, полученного после отжима сока из плодов граната, было выделено 1,94 кг семян и 3,06 кг кожуры.

Выход семян составил:

X = (1,94 / 5,0) × 100 = 38,8 %.

Выход кожуры составил:

X = (3,06 / 5,0) × 100 = 61,2 %.

Таким образом, для проведения дальнейших экспериментальных исследований использовали подготовленное вторичное сырье плодов граната, высушенное до остаточной влажности 7–8 % и разделенное на две основные фракции — семена и кожуру. В исходном сырье содержание семян составило 38,8 %, кожуры — 61,2 %. Полученные фракции использовали в дальнейших исследованиях в качестве исследуемого растительного сырья.

Выход экстрактивных веществ определяли следующим образом: точную навеску (100 мл) водного экстракта помещали в предварительно высушенный и взвешенный бюкс. Бюкс с экстрактом помещали в сушильный шкаф и сушили при температуре 60 °С. При высушивании открытый бюкс вместе с крышкой помещали в эксикатор для охлаждения на 50 мин, затем закрывали и взвешивали. Первое взвешивание проводили после сушки в течение 2 ч. Последующие взвешивали после каждого часа дальнейшего высушивания. Процесс сушки проводили до постоянной массы. Массовую долю сухого остатка (в %) вычисляли по формуле 2:

$$W = \frac{m_2 - m_1}{m} \cdot 100 ; \quad (2)$$

где: т – навеска, г; $т_1$– масса чашки, г; $т_2$– масса чашки с остатком после высушивания, г.

С целью выбора оптимального способа извлечения экстрактивных веществ из вторичного сырья плодов граната, образующегося после отжима сока, исходное сырье экстрагировали водой различными способами.

Способ 1 - ремацерация. 10,0 кг вторичного сырья плодов граната загружали в экстрактор и заливали 60,0 л очищенной воды. Экстракцию проводили в течение 8 часов при температуре 60 °С. После завершения экстракции полученный экстракт сливали в количестве 40,0 л, после чего в экстрактор заливали 40,0 л новой порции очищенной воды и проводили вторую экстракцию в аналогичных условиях. Таким же образом проводили третью экстракцию. Общий расход экстрагента при трехкратной экстракции составил 140,0 л, а соотношение растительного сырья и экстрагента (общий гидромодуль) — 1:14.

Способ 2 - экстракция с принудительной циркуляцией экстрагента. В экстрактор с установленным насосом для циркуляции экстрагента загружали 10,0 кг вторичного сырья плодов граната и заливали 60,0 л очищенной воды. Экстракцию проводили при температуре 60 °С с циркуляцией экстрагента со скоростью 100 л/ч для экстрактора с рабочим объёмом 1 м³. Экстрагент отбирали из нижней части экстрактора и подавали в верхнюю часть в виде душа. Первую экстракцию проводили в течение 8 часов, после чего экстракт сливали в количестве 40,0 л. В экстрактор заливали новую порцию очищенной воды в количестве

40,0 л и проводили вторую экстракцию в аналогичных условиях. Таким же образом проводили третью экстракцию. Общий расход экстрагента составил 140,0 л, а общий гидромодуль при трехкратной экстракции — 1:14.

Способ 3. Экстракция методом перемешивания. В экстрактор, оборудованный мешалкой, загружали 10,0 кг вторичного сырья плодов граната и заливали 100,0 л очищенной воды. Затем включали мешалку, вращавшуюся со скоростью 50 об/мин для экстрактора с рабочим объёмом 1 м³, и проводили экстракцию при температуре 60 °С в течение 8 часов. После завершения экстракции мешалку отключали, а экстракт сливали в количестве 80,0 л. В экстрактор заливали новую порцию очищенной воды в количестве 80,0 л и проводили вторую экстракцию в аналогичных условиях. Таким же образом проводили третью экстракцию. Общий расход экстрагента составил 260,0 л, а общий гидромодуль при трехкратной экстракции — 1:26.

Полученные экстракты объединяли и определяли содержание экстрактивных веществ в соответствии с описанной выше методикой.

Для оптимизации процесса экстракции экстрактивных веществ из вторичного сырья плодов граната методом принудительной циркуляции экстрагента эксперименты проводили по плану латинских квадратов 3×3.

Для установления оптимальных условий экстракции экстрактивных веществ из вторичного сырья плодов граната методом принудительной циркуляции экстрагента процесс экстракции проводили аналогично способу 2. В процессе экстракции через определённые интервалы времени отбирали пробы экстракта и определяли содержание экстрактивных веществ в соответствии с описанной выше методикой. Экстракцию прекращали при достижении фазового равновесия. После этого проводили вторую, третью и четвертую экстракции аналогично первой.

Результаты и их обсуждение

Для выбора рационального способа получения сухого экстракта из вторичного сырья плодов граната проведено сравнительное исследование различных способов водной экстракции. Оценивали выход экстрактивных веществ, общий гидромодуль и основные технологические параметры процесса. Полученные результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1. Влияние способа экстракции на выход сухого экстракта и технологические показатели процесса получения сухого экстракта из вторичного сырья плодов граната

Способ экстракции	Выход сухого экстракта, %	Общий гидромодуль
Ремацерация	19,09	1:14
Принудительная циркуляция	25,41	1:14
Перемешивание	25,80	1:26

Как видно из данных табл. 1, способ экстракции оказывает существенное влияние на выход экстрактивных веществ из вторичного сырья плодов граната. При ремацерации выход сухого экстракта составил 19,09 %, тогда как при использовании принудительной циркуляции и перемешивания данный показатель достигал 25,41 и 25,80 % соответственно.

Наибольший выход сухого экстракта получен при экстракции методом перемешивания — 25,80 %. Однако данный способ характеризовался более высоким общим расходом экстрагента, соответствующим гидромодулю 1:26. При использовании метода принудительной циркуляции выход сухого экстракта составил 25,41 %, что лишь на 0,39 процентного пункта ниже значения, полученного при перемешивании, при этом общий гидромодуль составлял 1:14.

Таким образом, применение принудительной циркуляции экстрагента обеспечивало получение близкого к максимальному выхода сухого экстракта при значительно меньшем расходе экстрагента по сравнению с методом перемешивания. В связи с этим метод принудительной циркуляции был выбран для дальнейшего изучения и оптимизации условий экстракции вторичного сырья плодов граната.

Исследование технологических процессов представляет собой трудоёмкий и длительный экспериментальный процесс, поэтому получение максимального объёма информации при минимальном числе опытов является важной задачей при разработке технологии. Применение методов математического планирования эксперимента позволяет повысить эффективность исследований и определить оптимальные условия проведения технологического процесса. В настоящее время для оптимизации и прогнозирования химико-технологических процессов широко применяются различные методы математического планирования эксперимента, в том числе методы Бокса–Уилсона, Бокса–Бенкена и планы латинских квадратов (3×3, 4×4 и др.) [1, 3–5, 7].

Для установления оптимальных условий экстракции экстрактивных веществ из вторичного сырья плодов граната методом принудительной циркуляции экстрагента нами использован план латинских квадратов 3×3.

В качестве факторов изучали следующие:

A – соотношение сырья и растворителя: A_1=1:3; A_2= 1:4; A_3=1:5.

B – скорость циркуляции экстрагента (на рабочий объёмом 1 м³): B_1 =80 л/ч; B_2=90 л/ч; B_3=100 л/ч.

C – степень измельченности сырья: C_1=4 мм; C_2= 8 мм; C_3=12 мм.

Опыты проводили по плану, приведенному в табл. 2.

Во всех опытах количество сырья и метод выделения были идентичными. В опытах использовали по 1,0 кг воздушно-сухого сырья. Параметром оптимизации служил выход экстрактивных веществ к массе сырья при первом контакте фаз. Результаты опытов представлены в табл. 2.

Таблица 2. План эксперимента и результаты эксперимента (среднее из двух значений)

План экспериментов				**Результаты экспериментов**			**Число опытов**	**Повторность опытов**
Факторы	**A_1**	**A_2**	**A_3**	**Выход экстрактивных веществ к массе сырья**				
B_1	C_1	C_2	C_2	9,2	8,8	14,1	N = 9	f = 2
B_2	C_2	C_3	C_1	5,3	9,3	12,4		
B_3	C_3	C_1	C_3	4,9	5,4	6,7		

Для установления значимости факторов провели дисперсионный анализ результатов эксперимента. Для этого в начале найдены суммы показателей каждого фактора по формуле 3:

$$T = \Sigma T_{ij} \quad (3)$$

Для этого в начале рассчитали суммы показателей каждого фактора (T_{ij}) и их средние значения (табл. 3).

Таблица 3. Сумма каждого фактора и их средние значения

Искомые значения	Фактор А			Фактор В			Фактор С		
	A_1	A_2	A_3	B_1	B_2	B_3	C_1	C_2	C_3
Сумма T_{ij}	19,4	23,5	33,2	32,1	27,0	17,0	27,0	28,2	20,9
Среднее	6,5	7,8	11,1	10,7	9,0	5,7	9,0	9,4	6,9

Данные, представленные в табл. 3, были использованы в формуле 3 для расчёта суммарных показателей влияния каждого фактора:

Результат: T = 76,1.

Дисперсию квадратов показателей всех наблюдений анализировали по формуле 4:

$$S^2=\Sigma Y_{ij}^{\ 2}\ ; \quad (4)$$

Результат: S^2=727,29.

Суммы квадратов каждого фактора вычисляли по формуле 5:

$$S_a^2 = \frac{1}{n}\sum T_{ij}^2\ ,\quad S_b^2 = \frac{1}{n}\sum T_{ij}^2\ ,\quad S_c^2 = \frac{1}{n}\sum T_{ij}^2 \quad (5)$$

Результат: $S_a^{\ 2}$ = 676,95;

$S_b^{\ 2}$ = 682,80;

$S_c^{\ 2}$ = 653,68.

На следующем этапе определены средние значения суммы квадратов T/N, затем общие значения суммы квадратов рассчитали по формуле 6:

$$SS_{общ} = S^2 - \frac{T^2}{N} \quad (6)$$

Результат: T/N =643,47.

$SS_{общ}$=83,82.

Суммы квадратов группы факторов вычисляли по формуле 7:

$$SS_a = S_a^2 - \frac{T^2}{N}\ ,\quad SS_b = S_b^2 - \frac{T^2}{N}\ ,\quad SS_c = S_c^2 - \frac{T^2}{N} \quad (7)$$

Результат: SS_a = 33,48;

SS_b = 39,34;

SS_c = 10,22.

Затем остаточную дисперсию рассчитали по формуле 8:

$$SS_{ост} = SS_{общ} - SS_a - SS_в - SS_c \quad (8)$$

Результат: $SS_{ост} = 0,79$.

Средний квадрат каждого фактора вычисляли по формуле 9:

$$S_a = \frac{SS_a}{f}; \quad S_b = \frac{SS_b}{f}; \quad S_c = \frac{SS_c}{f}; \quad (9)$$

где: $f = n - 1$

Результат: $S_a = 16,74$;

$S_b = 19,67$;

$S_c = 5,11$.

Остаточную дисперсию среднего квадрата каждого фактора вычисляли по формуле 10:

$$S_{ост} = \frac{SS_{ост}}{f}; \quad (10)$$

где: $f = (n - 1)(n - 2)$

Результат: $S_{ост} = 0,39$

Дисперсионные отношения вычисляли по формуле 11:

$$F_a = \frac{S_a}{S_{ост}}; F_b = \frac{S_b}{S_{ост}}; F_c = \frac{S_c}{S_{ост}}; \quad (11)$$

Результат: $F_a = 42,44$;

$F_b = 49,86$;

$F_c = 12,95$.

Табличное значение критерия Фишера Fтабл. (2,9) = 4,3 [2].

Коэффициент считается значимым, если его дисперсионное отношение превышает значение критерия Фишера. На основании результатов анализа все выбранные факторы признаны значимыми.

Наибольший выход экстрактивных веществ составил 14,1 % и был получен при сочетании факторов $A_3B_1C_2$. В качестве оптимальных значений факторов выбраны: соотношение сырья и растворителя — 1:5; скорость циркуляции экстрагента для экстрактора с рабочим объёмом 1 м³ — 80 л/ч; степень измельчения сырья — 8 мм.

Дальнейшие исследования были направлены на определение оптимальных условий экстракции экстрактивных веществ из вторичного сырья плодов граната методом экстракции с принудительной циркуляцией экстрагента. Результаты проведённых исследований представлены в виде диаграммы на рис. 1.

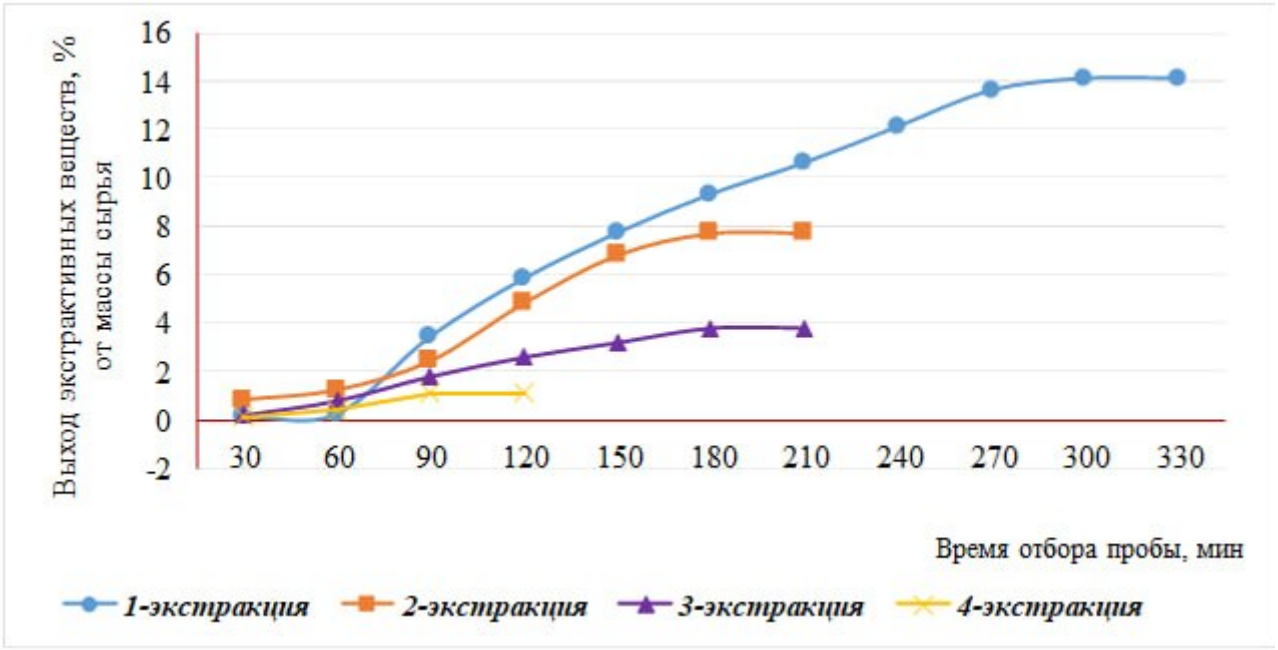


Рисунок 1. Динамика экстракции экстрактивных веществ из вторичного сырья плодов граната методом принудительной циркуляции экстрагента

Как видно из рис. 1, в процессе первой экстракции выход экстрактивных веществ постепенно увеличивался с увеличением продолжительности процесса. В течение первого часа выход экстрактивных веществ был низким, что связано с процессом набухания растительного сырья и постепенным проникновением экстрагента в структуру сырья. После набухания сырья интенсивность извлечения экстрактивных веществ возрастала. Наиболее интенсивное извлечение наблюдалось в интервале от 90 до 240 мин, после чего скорость накопления экстрактивных веществ в экстракте постепенно снижалась. К 300 мин выход достигал 14,1 %, а при дальнейшем увеличении продолжительности экстракции до 330 мин практически не изменялся, что свидетельствовало о приближении процесса к равновесному состоянию.

При второй экстракции основная часть экстрактивных веществ извлекалась в течение первых 180 мин. К этому времени выход достигал 7,7 % и при дальнейшем увеличении продолжительности экстракции до 210 мин практически не изменялся. При третьей экстракции выход экстрактивных веществ к 180 мин достигал 3,8 % и при дальнейшем увеличении времени также оставался практически неизменным.

При проведении четвёртой экстракции количество дополнительно извлекаемых веществ было значительно ниже по сравнению с предыдущими экстракциями. Уже через 120 мин выход составлял около 1,1 %, что указывает на незначительный вклад четвёртой экстракции в общий выход экстрактивных веществ.

Таким образом, результаты изучения динамики экстракции показали, что рациональная продолжительность первой экстракции составляет 300 мин (5 ч), второй и третьей — по 180 мин (3 ч). Суммарный выход экстрактивных веществ при трёхкратной экстракции составил 25,6 %. Проведение четвёртой экстракции нецелесообразно вследствие низкого дополнительного выхода экстрактивных веществ. На основании полученных данных для

дальнейших исследований был выбран трёхкратный способ экстракции с принудительной циркуляцией экстрагента. При этом первая экстракция должна проводиться не менее 5 ч, вторая и третья — по 3 ч.

Вывод

Проведено сравнительное исследование способов извлечения экстрактивных веществ из вторичного сырья плодов граната (*Punica granatum* L.), образующегося после отжима сока. Установлено, что при ремацерации выход экстрактивных веществ составил 19,09 %, при принудительной циркуляции — 25,41 %, а при перемешивании — 25,80 %. Несмотря на несколько более высокий выход при перемешивании, данный способ характеризовался значительным расходом экстрагента (общий гидромодуль 1:26). Метод принудительной циркуляции обеспечивал близкий к максимальному выход при гидромодуле 1:14, в связи с чем был выбран для дальнейшей оптимизации.

По результатам изучения динамики экстракции установлено, что рациональная продолжительность первой экстракции составляет 300 мин (5 ч), второй и третьей — по 180 мин (3 ч). Суммарный выход экстрактивных веществ при трехкратной экстракции составил 25,6 %. Четвертая экстракция обеспечивала лишь около 1,1 % дополнительного выхода за 120 мин и поэтому не была включена в рациональную схему процесса. На основании полученных результатов для дальнейшей разработки технологии выбран трехкратный способ экстракции с принудительной циркуляцией экстрагента: первая экстракция — не менее 5 ч, вторая и третья — по 3 ч.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансировании проекта AL-8724052925 Агентством инновационного развития при Министерстве высшего образования, науки и инноваций по теме: Исследование ключевых технологий для разработки высококачественного здорового питания на основе биоактивных веществ граната.

Список литературы

1. Анисимов П.Н. Об использовании методики планирования эксперимента в соответствие с трехуровневыми планами Бокса-Бенкена // Вестник магистратуры. – 2017. – № 2–2 (65). – С. 32–36.
2. Ахназарова С.Л., Кафаров В.В. Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии. Москва. 1978. 319 с.
3. Бабин А.В., Ракипов Д.Ф. Организация и математическое планирование эксперимента. Екатеринбург. 2014. С. 85–94.
4. Кариева Ё.С., Садикова Р.К., Каримов О.У., Нуридуллаева К.Н. Изучение процесса экстракции изосалипурпозида из цветков бессмертника самаркандского // Химия растительного сырья. – 2024. – № 1. – С. 354–361.

5. Маматханов А.У., Хажибаев Т.А., Халилов Р.М. Технология получения суммы иридоидов из отходов переработки надземной части Ajuga turkestanica // Химия растительного сырья. – 2023. – № 3. – С. 293–302.
6. Cano-Lamadrid M., Martínez-Zamora L., Castillejo N., Artés-Hernández F. From Pomegranate Byproducts Waste to Worth: A Review of Extraction Techniques and Potential Applications for Their Revalorization // Foods. – 2022. – Т. 11, № 17. – Art. 2596. – DOI: 10.3390/foods11172596.
7. Hajibaev T.A., Khalilov R.M. The Process Optimization of Furostanol Saponins Extraction from the Aerial Part of Tribulus Terrestris // International Journal of Scientific Research in Chemical Sciences. – 2023. – Т. 10.
8. Huang Z., Foo S.C., Choo W.S. A review on the extraction of polyphenols from pomegranate peel for punicalagin purification: techniques, applications, and future prospects // Sustainable Food Technology. – 2025. – Т. 3. – P. 396–413. – DOI: 10.1039/D4FB00304G.
9. Saewan S.A. et al. Nutritional importance and industrial uses of pomegranate peel: A critical review // Food Science & Nutrition. – 2023. – Т. 11, № 6. – P. 2589–2598. – DOI: 10.1002/fsn3.3320.
10. Siddiqui S.A., Singh S., Nayik G.A. Bioactive compounds from pomegranate peels – Biological properties, structure–function relationships, health benefits and food applications – A comprehensive review // Journal of Functional Foods. – 2024. – Т. 116. – DOI: 10.1016/j.jff.2024.106132.

References

1. Anisimov P.N. [On the use of the experimental design methodology in accordance with three-level Box-Behnken designs] // Vestnik magistratury. – 2017. – No. 2–2 (65). (In Russ.).
2. Akhnazarova S.L., Kafarov V.V. [Optimization of Experiment in Chemistry and Chemical Technology. Moscow. 1978. 319 P.] (In Russ.).
3. Babin A.V., Rakipov D.F. [Organization and Mathematical Planning of Experiment. Yekaterinburg. 2014. Pp. 85–94] (In Russ.).
4. Karieva Yo.S., Sadikova R.K., Karimov O.U., Nuridullaeva K.N. [Study of the extraction process of isosalipurposide from flowers of Helichrysum samarkandicum] // Khimiya rastitel'nogo syr'ya. – 2024. – No. 1. (In Russ.).
5. Mamatkhanov A.U., Khazhibaev T.A., Khalilov R.M. [Technology for obtaining the sum of iridoids from processing waste of the aerial part of Ajuga turkestanica] // Khimiya rastitel'nogo syr'ya. – 2023. – No. 3. (In Russ.).
6. Cano-Lamadrid M., Martínez-Zamora L., Castillejo N., Artés-Hernández F. From Pomegranate Byproducts Waste to Worth: A Review of Extraction Techniques and Potential Applications for Their Revalorization // Foods. – 2022. – Vol. 11, No. 17. – Art. 2596. – DOI: 10.3390/foods11172596.

7. Hajibaev T.A., Khalilov R.M. The Process Optimization of Furostanol Saponins Extraction from the Aerial Part of Tribulus Terrestris // International Journal of Scientific Research in Chemical Sciences. – 2023. – Vol. 10.
8. Huang Z., Foo S.C., Choo W.S. A review on the extraction of polyphenols from pomegranate peel for punicalagin purification: techniques, applications, and future prospects // Sustainable Food Technology. – 2025. – Vol. 3. – P. 396–413. – DOI: 10.1039/D4FB00304G.
9. Saewan S.A. et al. Nutritional importance and industrial uses of pomegranate peel: A critical review // Food Science & Nutrition. – 2023. – Vol. 11, No. 6. – P. 2589–2598. – DOI: 10.1002/fsn3.3320.
10. Siddiqui S.A., Singh S., Nayik G.A. Bioactive compounds from pomegranate peels – Biological properties, structure–function relationships, health benefits and food applications – A comprehensive review // Journal of Functional Foods. – 2024. – Vol. 116. – DOI: 10.1016/j.jff.2024.106132.

Статья поступила в редакцию: 10.09.2026
Статья принята к публикации: 07.10.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 663.252.1

Применение озоновой обработки для продления сроков хранения и сохранения качества винограда

Наркабулова Наргиза Чоршаммиевна
доц.
Ташкентский государственный аграрный университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: nargiza.narkabulova@gmail.com

Таджибекова Ирода Эмильевна
ст. преп. Ташкентский государственный аграрный университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: iroda.tadjibekova@gmail.com

Абдикаюмов Зайнилабиддин
доц.
Ташкентский государственный аграрный университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: z.abdikayumov@gmail.com

Application of ozone treatment for extending the storage life and preserving the quality of grapes

Narkabulova Nargiza
Associated professor
Tashkent State Agrarian University
Uzbekistan, Tashkent

Tadjibekova Iroda
Associated professor
Tashkent State Agrarian University
Uzbekistan, Tashkent

Abdikayumov Zaynilabiddin
Postdoctoral researcher
Tashkent State Agrarian University
Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

Обеспечение продовольственной безопасности напрямую зависит от эффективности широко используемых технологий хранения сельскохозяйственной продукции. Для сохранения органолептических свойств, свежести и предотвращения послеуборочной порчи

Библиографическое описание: Наркабулова Н.Ч., Таджибекова И.Э., Абдикаюмов З. Применение озоновой обработки для продления сроков хранения и сохранения качества винограда // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23511

плодоовощных культур применяются специализированные физико-химические режимы и консервирующие вещества. В данной работе, подробно рассматривается влияние озонирования на физиологические процессы проходящие в продукции и влияющие на сроки хранения скоропортящегося растительного сырья. Исследование показало, что благодаря выраженным окислительным и бактерицидным свойствам озон эффективно подавляет развитие фитопатогенной и сапрофитной микрофлоры. Представлены результаты оригинальных опытов по обработке озоно-воздушными смесями трех промышленно значимых столовых сортов винограда (Vitis vinifera L.) Республики Узбекистан: Хусайни белый, Ризамат и Кишмиш чёрный. Разработана и экспериментально обоснована экологически безопасная технология прерывисто-импульсного (дробного) озонирования в условиях промышленного холодильного хранения. Установлено, что циклическое воздействие низких концентраций озона (3 мг/м³) обеспечивает снижение микробной обсеменённости, замедляет деструкцию защитного пруинового налета и пролонгирует сохраняемость ягод в среднем на семь суток. Метод минимизирует риски окислительного повреждения тканей плодов, демонстрируя высокую экономическую эффективность. Применение озонной обработки позволяет минимизировать использование химических средств защиты при хранении.

Abstract

Ensuring food security directly depends on the efficiency of agricultural product storage technologies. Specialized physicochemical regimes and preservative substances are applied to maintain organoleptic properties, freshness, and prevent postharvest spoilage of fruit and vegetable crops. This paper examines in detail the effect of ozonation on physiological processes and shelf life of perishable plant raw materials, aligning with modern international «green» preservation trends. The study demonstrated that due to its pronounced oxidative and bactericidal properties, ozone effectively suppresses the development of phytopathogenic and saprophytic microflora. The results of original experiments on treating three commercially significant table grape varieties (*Vitis vinifera L.*) of the Republic of Uzbekistan with ozone-air mixtures are presented: Khusayni belyi, Rizamat, and Kishmish chorny. An environmentally safe technology of intermittent-pulse (fractional) ozonation under conditions of industrial cold storage has been developed and experimentally substantiated. It was found that cyclic exposure to low ozone concentrations (3 mg/m³) provides a substantial reduction in microbial contamination, slows down the destruction of the protective pruinose layer, and prolongs the shelf life of berries by an average of seven days. The method minimizes the risks of oxidative damage to fruit tissues, demonstrating high economic efficiency. The use of ozone treatment makes it possible to minimize the use of chemical protectants and pesticide residues during storage.

Ключевые слова: Озон, микроорганизмы, биологическое воздействие, концентрация, патогенная микрофлора, хранение, обеззараживание.

Keywords: ozone, microorganisms, biological effects, concentration, pathogenic microflora, storage, decontamination.

Введение

Актуальной проблемой агропромышленного комплекса является обеспечение высоких показателей качества и безопасности собранного урожая в течение всего срока хранения. Традиционные способы, такие как холодильное хранение, использование регулируемых газовых сред являются весьма дорогостоящими. Кроме того, холодильное хранение может вызывать повреждения поверхности овощей и фруктов из-за воздействия низких температур [8]. В последние годы на мировом продовольственном рынке наблюдается ужесточение требований к экологической безопасности и качеству плодоовощной продукции [15, с. 63]. Основным инструментом, обеспечивающим стабилизацию качества винограда в процессе транспортировки и хранения, является использование сернистого ангидрида – газа, обладающего свойствами, которые позволяют ингибировать не ферментативное потемнение, снизить активность ферментов, эффективно контролировать развитие Botrýtis cinérea и действующего как антиоксидант [3]. В связи с риском накопления остаточных количеств химических веществ в растительном сырье особую актуальность приобретает сокращение применения синтетических пестицидов при хранении сельскохозяйственной продукции и поиск безопасных альтернативных технологий [19, с. 40; 16].

Одним из перспективных экологически безопасных методов является применение озоно-воздушных смесей. Озон обладает выраженными окислительными и бактерицидным свойствами, благодаря чему способен подавлять развитие патогенной и сапрофитной микрофлоры, снижать микробную обсеменённость продукции и тем самым способствовать продлению сроков её хранения [20; 18]. Кроме того, озон может оказывать положительное воздействие на складскую среду, в частности способствовать снижению концентрации этилена — фитогормона, участвующего в регуляции процессов созревания и старения плодов [20].

Одной из основных причин значительных потерь плодоовощной продукции является нарушение оптимальных условий хранения, приводящее к ускоренному созреванию, физиологическим изменениям и развитию микроорганизмов [6, с. 33]. По данным различных исследований, потери при хранении и транспортировке плодоовощной продукции могут достигать значительных масштабов, что обусловливает необходимость совершенствования существующих и разработки новых экологически безопасных и энергосберегающих технологий [20; 13].

В этом контексте озонирование представляет значительный научный и практический интерес как технологический способ регулирования микробиологических и физиологических процессов, протекающих в хранящейся продукции [13]. Правильно подобранные концентрация озона и продолжительность обработки позволяют снизить интенсивность развития патогенной микрофлоры и замедлить процессы созревания и порчи, что способствует сохранению качества продукции и сокращению послеуборочных потерь [18; 15]. Инновационные технологии хранения должны не только обеспечить снижение потерь, но и сохранение высоких товарных качеств продукции, в значительной степени зависящих от биохимического состава [4]. Физические повреждения, возникающие в результате даже минимального воздействия, особенно наличие поврежденной поверхности, приводят к разрушению клеточной мембраны, прямому контакту ферментов и их субстратов, что

ускоряет потерю качества. Атаки микробов легко обнаруживаются в плохо высушенном и поврежденном винограде. Более высокие исходные микробные нагрузки влияют на более короткий срок хранения [11].

Для продления сроков хранения винограда применяется множество нестандартных методов, например обдувание горячим воздухом. Полученные данные свидетельствуют, что после обработки теплым воздухом в процессе хранения наблюдаются снижение убыли массы и общих потерь, количество гнили сокращается на более чем 15 % [9]. Но, в нашем случае, такие методы являются достаточно затратными и возникает необходимость изучения, альтернативных вариантов.

На сегодняшний день в мире накоплен значительный опыт применения озона для обработки фруктов и овощей с целью увеличения сроков их хранения [20]. Использование фунгицидов ограничено периодом вегетации, поэтому в последнее время акцент смещается в сторону технологий, подавляющих патогенную микрофлору без накопления токсичных остатков [10, с. 22].

Методы исследования

Для повышения эффективности обеззараживания сельскохозяйственной продукции без ухудшения её качественных характеристик была использована технология прерывисто-импульсного озонирования, основанная на циклическом воздействии озона в относительно низких концентрациях [13]. В отличие от непрерывной обработки высокими дозами озона, способными оказывать неблагоприятное воздействие на ткани плодов [19], предложенный режим предусматривает последовательное проведение нескольких кратковременных обработок с определёнными интервалами между ними.

Для экспериментальной оценки эффективности прерывисто-импульсного озонирования были отобраны три промышленно значимых столовых сорта винограда (*Vitis vinifera L.*), широко возделываемых в виноградарских зонах Республики Узбекистан: Хусайни белый, Ризамат и Кишмиш чёрный (Кора кишмиш) [10, с. 23]. Выбор указанных сортов обусловлен необходимостью оценки дифференцированного отклика виноградных ягод на воздействие озоновоздушной среды с учётом различий в морфологических, биохимических и структурно-механических характеристиках [19].

Сорта отличаются строением и плотностью гроздей, размером и механической прочностью ягод, толщиной покровных тканей, а также пигментным составом кожицы. Данные особенности могут определять различную устойчивость ягод к окислительному воздействию озона и влиять на сохранение их товарного качества в процессе хранения [18]. На первом этапе проводили так называемую «шоковую» обработку повышенной дозой озона, направленную на подавление наиболее чувствительной вегетативной микрофлоры. Последующие обработки осуществляли по истечении 18–24 часов. Такой интервал был выбран с целью воздействия на микроорганизмы, сохранившие жизнеспособность после первоначальной обработки и перешедшие в более чувствительное к озону состояние. Повторные циклы обработки позволяли последовательно снижать микробную обсеменённость продукции без длительного воздействия высоких концентраций озона.

Концентрацию озона при последующих обработках рассчитывали с учётом производительности используемого озонатора, объёма холодильной камеры и заданного режима обработки. Озонирование проводили в замкнутом объёме холодильной камеры при контролируемых параметрах процесса. Всего предусматривалось 3–4 последовательных цикла обработки.



Рисунок 1. Контрольный образец винограда сорта Ризамат и Кора кишмиш

Контрольные образцы хранились в холодильной камере 14 дней при +4^{o}C, влажность 80 – 85 %. На рисунке видно, что сохранность средняя. Виноград сорта Ризамат имеет в грозди растрескивание ягод. Пуриновый слой нарушен. Ягоды винограда Кора Кишмиш имеют среднюю сохранность, происходит постепенное осыпание ягод и одеревенение стебля.

Краткая характеристика исследуемых сортов винограда представлена в таблице 1. *Примечание к таблице.* Обработка проводилась озонатором с производительностью 1000 мг/ч. Время обработки продукции озонно- воздушной смесью рассчитано с учетом размеров камеры холодильника. Размеры камеры холодильника 1,83м×0,61м×0,50м. Объем холодильной камеры V=1,83м*0,61м*0,50м= 0.558 м$^{3.}$

Таблица 1. Агробиологическая и технологическая характеристика опытных сортов винограда

Сорт	Состояние кожицы плодов	Состояние гребня	Воздействие озона О3 .	Концентрация озона и время экспозиции (сек)
Хусайни	Тонкая нежная	Быстро теряет влагу	Защита от плесени	3мг/м^3 5-10 с
Ризамат	Крупный мясистый с плотной кожицей	Кожица имеет склонность к растрескиванию у плодоножки при перепаде показателя влажности	Защита от плесени	3мг/м^3 5-10 с
Кора кишмиш	Мягкие мелкие ягоды с тонкой кожицей	Плохая вентиляция внутри кисти. Гниль распространяется лавинообразно	Защита от плесени и гнили	3мг/м^3 5-10 с

Таблица 2. Исходные физико-химические данные исследуемых сортов винограда

Наименование показателя качества сырья	Сорт Хусайни белый	Сорт Ризамат	Сорт Кора кшмиш	Метод определения / Прибор
Средняя масса грозди, г	450± 25	650 ± 40	360 ± 20	Гравиметрия / Электронные весы ВЛЭ-2100
Показатель строения грозди (масса ягод / масса гребня)	24.5 ± 1.2	32.1 ± 1.5	29.4 ±1.1	Гравиметрия после отделения ягод
Массовая доля сухих растворимых веществ (СРВ), % (°Вх	17.2 ± 0.4	18.5± 0.3	22.4± 0.6	Рефрактометрия / Цифровой рефрактометр PAL-1 (Atago)



Рисунок 2. Образцы винограда Ризамат и Кора Кишмиш после циклической обработки в течении14 дней

Виноград представленный на рис. 2 сорта Ризамат и Кора Кишмиш обрабатывался в течении 14 суток озоном в концентрации 3мг/м^3, время экспозиции 5 – 10 сек, размер холодильной камеры 1,83м×0,61м×0,50м. Время экспозиции рассчитывалось исходя из значения производительности озонатора 1000 мг/ч. Условия хранения: температура в холодильной камере +4^{o}C, влажность 80 – 85 %. Обработка озоном проводилась в течении 14 суток. На рисунке 2. можно видеть, что состояние винограда сорта Ризамат отличное, тургор и целостность ягод сохранена. Состояние винограда сорта Кора Кишмиш: целостность ягод и грозди сохранена, осыпания ягод не наблюдается, но наблюдается начальная стадия высыхания гребня.

Результаты исследования и их обсуждение

Контрольные образцы винограда хранились в холодильной камере в течение 14 дней при температуре +4 °C и относительной влажности воздуха 80–85 % [6, с. 35]. Наблюдения показали, что общая сохранность оценивается как средняя. Виноград помологического сорта Ризамат обнаруживает склонность к растрескиванию отдельных ягод в грозди, при этом его защитный пруиновый (восковой) налет существенно нарушен, что открывает ворота для фитопатогенной инфекции. Ягоды винограда сорта Кора кишмиш также демонстрируют среднюю сохраняемость: в контрольной группе отмечается постепенное осыпание ягод

и нежелательное одревеснение (увядание) стеблей гребня. Образцы винограда сортов Ризамат и Кора кишмиш, прошедшие циклическую (прерывисто-импульсную) обработку в течение 14 суток, обрабатывались озоном в концентрации 3мг/м^3 с экспозицией до полного насыщения в замкнутом объеме лабораторной холодильной камеры [18]. Условия хранения полностью соответствовали контрольной группе (температура +4 °C, влажность 80–85 %).

Визуальный и лабораторный анализ показал, что состояние обработанного винограда сорта Ризамат оценивается как отличное: полностью сохранены тургор и механическая целостность ягод [19]. В опытных образцах сорта Кора кишмиш целостность ягод и структуры грозди также была полностью сохранена, выраженного осыпания не зафиксировано, однако отмечалась начальная стадия высыхания гребня, обусловленная естественными транспирационными процессами. В результате экспериментальных обработок, проводившихся в течение 14 дней, можно сделать ключевые выводы: сорта Хусайни белый и Кора кишмиш в обычных условиях теряют свои товарные качества постепенно. Применение циклического озонирования позволило существенно замедлить процессы увядания и отодвинуть массовое осыпание ягод в среднем на 7 дней позже по сравнению с контрольной партией [15]. Виноград сорта Ризамат после озонирования сохранил превосходный товарный вид, ягоды не потеряли тургор, а пруиновый слой остался неповрежденным. Это указывает на высокую сортовую устойчивость покровных тканей Ризамата к окислительному воздействию низких доз озона [19].

Заключение

Таким образом, перспективность использования прерывисто-импульсного озонирования в процессах холодильного хранения столового винограда Узбекистана экспериментально доказана. Данная экологически безопасная технология позволяет регулировать микробиологические процессы, сохранять исходные физико-химические показатели, питательную ценность, пруиновый слой и тургор ягод [18]. Метод значительно пролонгирует сроки хранения скоропортящейся продукции и минимизирует послеуборочные потери без увеличения себестоимости [19; 13].

Список литературы

1. Агеева Н.М. и др. Влияние озонирования на микробиологические показатели винограда при хранении // Магарач. Виноградарство и виноделие. – 2020. – Т. 22, № 1. – С. 23–26.
2. Борченкова Л.А. Обеспечение качества и безопасности свежей плодоовощной продукции при хранении // Пищевая промышленность. – 2019. – № 11. – С. 62–65.
3. Горлов С.М., Тягущева А.А., Яцушко Е.С.,Карпенко Е.Н. Современные технологии хранения винограда Научный журнал КубГАУ, №159(05), 2020 год.
4. Горлов С.М., Тягущева А.А. Яцушко Е.С., Карпенко Е.Н. Исследование влияния обработки сернистым ангидридом на показатели качества винограда в процессе хранения. Научный журнал КубГАУ, №160(06), 2020 год.
5. Дикарев Д.А. Применение озонирования в технологиях хранения сельскохозяйственного сырья // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2021. – № 3. – С. 32–37.

6. Клементьев А.П., Никитин В.В. Перспективные физические методы снижения потерь растительного сырья // Аграрный вестник. – 2022. – № 4. – С. 48–52.
7. Панфилов В.А. Физико-химические и биологические основы послеуборочной обработки ягод // Достижения науки и техники АПК. – 2018. – № 9. – С. 41–45.
8. Першакова Т.В.Г.А. Купин, В.Н. Алешин, С.М. Горлов, Е.Ю. Панасенко, Современные методы предотвращения микробиологической порчи и увеличения сроков хранения продукции растениеводства. International Journal of Humanities and Natural Sciences – Технические науки -С. 115. – 2018.
9. Хоконова М.Б. Комплексная технология длительного хранения винограда // Известия Кабардино-Балкарского ГАУ. – 2020. – № 2 (28).
10. Шодиева Ш.С., Наркабулова Н.Ч. Роль экологически безопасных методов в повышении сохраняемости плодово-ягодного сырья // Вестник Ташкентского государственного аграрного университета. – 2022. – № 2. – С. 21–25.
11. Яцушко Е.С. Диссертация. Разработка технологии хранения винограда столовых сортов с применением плёнкообразующих покрытий. 2021г. Стр 12. – 2021.
12. Artés-Hernández F. et al. Quality changes of fresh-cut tomato treated with gaseous ozone // Postharvest Biology and Technology. – 2007. – Т. 43, № 3. – P. 363–370.
13. Da E., Sitoe E.P.E., Faroni L.R.A., Santana R.F. Postharvest quality of grapes treated with ozone mist, isolated and combined ozone gas stored at different temperatures // Postharvest Biology and Technology. – 2025. – Т. 228. – Art. 113655.
14. Guzel-Seydim Z.B., Greene A.K., Seydim A.C. Use of ozone in the food industry // LWT – Food Science and Technology. – 2004. – Т. 37, № 2. – P. 239–247.
15. Li Z., Wang Y., Wang X. Ozone treatment controlled postharvest table grape blue mold by regulating ergosterol and ochratoxin A biosynthesis // Postharvest Biology and Technology. – 2025. – Т. 223. – Art. 113102.
16. Sánchez-Rubio M., Taboada-Rodríguez A. et al. Pesticide Residues and Berry Microbiome after Ozonated Water Treatments // Foods. – 2023. – Т. 12, № 17.
17. Sarig P., Zahavi T., Zutkhi Y. Ozone for the control of postharvest decay of table grapes caused by Botrytis cinerea // Physiological and Molecular Plant Pathology. – 1996. – Т. 48, № 3. – P. 89–96.
18. Sharma A., Kumar R. et al. Storage and Quality of Ozone-Fumigated 'Manik Chaman' Table Grapes: A Comparison with Sulfur Dioxide Treatment // Applied Fruit Science. – 2025. – Т. 67, № 4. – P. 312–321.
19. Vinothkannan V., Sethi S., Grover M., Kumar C., Daniel G.A. Postharvest Quality Retention of ‘Flame Seedless’ Grapes Using Aqueous Ozone Treatment // Applied Fruit Science. – 2026. – Т. 68, № 3. – P. 195–204.
20. Zhang C., Wang Q., He H., Wu Y., Shan W., Liu H. Postharvest Preservation Strategies for Table Grapes: A Comprehensive Review from Practical Methods to Future Developments // Plants. – 2025. – Т. 14, № 16.

References

1. Ageeva N.M. i dr. [Effect of ozonation on microbiological indicators of grapes during storage] // Magarach. Vinogradarstvo i vinodelie. – 2020. – Vol. 22, No. 1. (In Russ.).
2. Borchenkova L.A. [Ensuring the quality and safety of fresh fruit and vegetable products during storage] // Pishchevaya promyshlennost'. – 2019. – No. 11. (In Russ.).
3. Gorlov S.M., Tyagushcheva A.A., Yatsushko E.S.,Karpenko E.N. [Modern technologies for storing grapes // Scientific Journal of KubSAU, No. 159(05). – 2020. – No. 159 (05). (In Russ.).
4. Gorlov S.M., Tyagushcheva A.A. [Yatsushko E.S., Karpenko E.N. Study of the effect of sulfur dioxide treatment on grape quality indicators during storage // Scientific Journal of KubSAU, No. 160(06). – 2020. – No. 160 (06). (In Russ.).
5. Dikarev D.A. [Application of ozonation in storage technologies for agricultural raw materials] // Khranenie i pererabotka sel'khozsyr'ya. – 2021. – No. 3. (In Russ.).
6. Klement'ev A.P., Nikitin V.V. [Promising physical methods for reducing losses of plant raw materials] // Agrarnyj vestnik. – 2022. – No. 4. (In Russ.).
7. Panfilov V.A. [Physicochemical and biological foundations of postharvest processing of berries] // Dostizheniya nauki i tekhniki APK. – 2018. – No. 9. (In Russ.).
8. Pershakova T.V., G.A. [Kupin, V.N., Aleshin, S.M., Gorlov, E.Yu., Panasenko. Modern methods for preventing microbiological spoilage and extending the storage life of crop products. International Journal of Humanities and Natural Sciences – Technical Sciences – P. 115. 2018] (In Russ.).
9. Khokonova M.B. [Integrated technology for long-term storage of grapes] // Izvestiya Kabardino-Balkarskogo GAU. – 2020. – No. 2 (28). (In Russ.).
10. Shodieva Sh.S., Narkabulova N.Ch. [The role of environmentally safe methods in improving the storability of fruit and berry raw materials] // Vestnik Tashkentskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2022. – No. 2. (In Russ.).
11. Yatsushko E.S. [Dissertation. Development of a storage technology for table grape varieties using film-forming coatings. 2021. P. 12]. – 2021 (In Russ.).
12. Artés-Hernández F. et al. Quality changes of fresh-cut tomato treated with gaseous ozone // Postharvest Biology and Technology. – 2007. – Vol. 43, No. 3. – P. 363–370.
13. Da E., Sitoe E.P.E., Faroni L.R.A., Santana R.F. Postharvest quality of grapes treated with ozone mist, isolated and combined ozone gas stored at different temperatures // Postharvest Biology and Technology. – 2025. – Vol. 228. – Art. 113655.
14. Guzel-Seydim Z.B., Greene A.K., Seydim A.C. Use of ozone in the food industry // LWT – Food Science and Technology. – 2004. – Vol. 37, No. 2. – P. 239–247.
15. Li Z., Wang Y., Wang X. Ozone treatment controlled postharvest table grape blue mold by regulating ergosterol and ochratoxin A biosynthesis // Postharvest Biology and Technology. – 2025. – Vol. 223. – Art. 113102.
16. Sánchez-Rubio M., Taboada-Rodríguez A. et al. Pesticide Residues and Berry Microbiome after Ozonated Water Treatments // Foods. – 2023. – Vol. 12, No. 17.

17. Sarig P., Zahavi T., Zutkhi Y. Ozone for the control of postharvest decay of table grapes caused by Botrytis cinerea // Physiological and Molecular Plant Pathology. – 1996. – Vol. 48, No. 3. – P. 89–96.
18. Sharma A., Kumar R. et al. Storage and Quality of Ozone-Fumigated 'Manik Chaman' Table Grapes: A Comparison with Sulfur Dioxide Treatment // Applied Fruit Science. – 2025. – Vol. 67, No. 4. – P. 312–321.
19. Vinothkannan V., Sethi S., Grover M., Kumar C., Daniel G.A. Postharvest Quality Retention of ‘Flame Seedless’ Grapes Using Aqueous Ozone Treatment // Applied Fruit Science. – 2026. – Vol. 68, No. 3. – P. 195–204.
20. Zhang C., Wang Q., He H., Wu Y., Shan W., Liu H. Postharvest Preservation Strategies for Table Grapes: A Comprehensive Review from Practical Methods to Future Developments // Plants. – 2025. – Vol. 14, No. 16.

Статья поступила в редакцию: 20.09.2026
Статья принята к публикации: 28.09.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 664.8.037:66.048.5

Интенсификация процесса конденсации вторичного пара в аппаратах концентрирования виноградного сока за счет оптимизации гидродинамики ФАЗ

Рамазонов Собиржон Саид угли
самостоятельный исследователь, Бухарский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Бухара

Хабибов Фахриддин Юсупович
канд. техн. наук, доц.
кафедры, Бухарский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Бухара

Шарипов Нодиржон Замирович
канд. техн. наук, доц.
кафедры, Бухарский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Бухара
E-mail: nodirzhons@bk.ru

Intensification of secondary vapor condensation in grape juice concentration apparatus through optimization of phase hydrodynamics

Ramazonov Sobirjon
Independent Researcher
Bukhara State Technical University
Uzbekistan, Bukhara

Khabibov Fakhriddin
candidate of Technical Sciences (PhD)
Associate Professor, Bukhara State Technical University
Uzbekistan, Bukhara

Sharipov Nodirjon
candidate of Technical Sciences (PhD)
Associate Professor, Bukhara State Technical University
Uzbekistan, Bukhara

Аннотация

Предмет исследования. Процесс смесительной конденсации вторичного пара при концентрировании виноградного сока в барометрическом конденсаторе при диспергировании охлаждающей воды.

Библиографическое описание: Рамазонов С.С.У., Хабибов Ф.Ю., Шарипов Н.З. Интенсификация процесса конденсации вторичного пара в аппаратах концентрирования виноградного сока за счет оптимизации гидродинамики ФАЗ // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23507

Цель работы. Интенсификация тепломассообмена и повышение энергоэффективности вакуум-выпарных установок путем оптимизации фазовой гидродинамики в барометрическом конденсаторе смесительного типа за счет форсуночного распыления охлаждающей воды.

Методология. Эксперименты проводились на вакуум-выпарной установке при концентрировании виноградного сока (сорт «Кишмиш черный», 16–18 % Brix). Исследовалась гидродинамика взаимодействия вторичного пара с мелкодисперсными каплями охлаждающей воды, распыляемой через центробежно-струйные форсунки различной геометрии. Давление в конденсаторе поддерживалось в диапазоне 15–30 кПа. Распределение капель по размерам и динамика их движения фиксировались методами скоростной фотосъемки и лазерной доплеровской анемометрии.

Результаты. Научно обосновано, что замена традиционных полочных (каскадных) элементов барометрического конденсатора на систему мелкодисперсного форсуночного распыления позволяет кардинально перестроить гидродинамику фаз. При среднем диаметре капель d_k = 1,2–1,8 мм создается развитая удельная поверхность контакта фаз (до 162 м²/м³), что переводит процесс конденсации в высокотурбулентный режим. Установлено увеличение объемного коэффициента теплоотдачи на 52,4 %. Глубина создаваемого вакуума стабилизировалась на уровне 92–94 %, что позволило снизить температуру кипения сока и полностью сохранить термолабильные компоненты сырья.

Область применения. Разработанная гидродинамическая схема и режимные параметры рекомендуются для модернизации действующих барометрических конденсаторов на предприятиях пищевой и винодельческой промышленности.

Abstract

Subject. The process of mixing-type condensation of secondary vapor during grape juice concentration in a barometric condenser with dispersed cooling water.

Purpose. To intensify heat and mass transfer and improve the energy efficiency of vacuum-evaporation plants by optimizing phase hydrodynamics in a mixing-type barometric condenser through nozzle spraying of cooling water.

Methodology. Experiments were carried out on a vacuum-evaporation plant during concentration of grape juice (“Kishmish chorniy” variety, 16–18 % Brix). The hydrodynamics of the interaction between secondary vapor and finely dispersed cooling-water droplets sprayed through centrifugal-jet nozzles of various geometries were studied. Pressure in the condenser was maintained in the range of 15–30 kPa. Droplet size distribution and droplet motion dynamics were recorded by high-speed photography and laser Doppler anemometry.

Results. It was scientifically substantiated that replacing traditional shelf (cascade) elements of the barometric condenser with a fine-droplet nozzle-spraying system fundamentally restructures the phase hydrodynamics. At an average droplet diameter of d_k = 1.2–1.8 mm, a developed specific phase-contact surface (up to 162 m²/m³) is created, transferring the condensation process into a highly turbulent regime. The volumetric heat-transfer coefficient was found to increase by 52.4 %. The depth of the vacuum created stabilized at 92–94 %, which reduced the juice boiling temperature and fully preserved the thermolabile components of the raw material.

Practical implications. The developed hydrodynamic scheme and operating parameters are recommended for the modernization of existing barometric condensers at food and wine-making enterprises.

Ключевые слова: виноградный сок, вакуум-выпаривание, вторичный пар, барометрический конденсатор смесительного типа, форсуночное распыление, интенсификация теплообмена.

Keywords: grape juice, vacuum evaporation, secondary vapor, mixing-type barometric condenser, nozzle spraying, heat-transfer intensification.

1. Введение

При концентрировании пищевых растворов, в частности виноградного сока, ключевой задачей является сохранение исходного качества продукта (витаминов, сахаров, ароматических веществ) при минимальных затратах тепловой и электрической энергии [1]. Достижение этого возможно только при снижении температуры кипения сока путем интенсификации работы вакуум-создающих систем и эффективной конденсации вторичного пара.

В традиционных барометрических конденсаторах смесительного типа (полочных или каскадных) контакт пара и охлаждающей воды происходит на стекающих водяных завесах (струях). Такая гидродинамическая структура имеет существенные ограничения: толщина водяных струй относительно велика, а удельная поверхность контакта фаз ограничена геометрией полок. Это приводит к недоконденсации части вторичного пара, ухудшению вакуума и перерасходу охлаждающей воды.

Фундаментальные принципы анализа гидродинамики многофазных сред при дроблении сплошного потока жидкости на дисперсную (капельную) фазу подробно рассмотрены в классических работах по гидродинамике и теплообмену [3, 6]. Применение вакуумного концентрирования соков как энергосберегающей альтернативы традиционному упариванию подтверждается рядом современных исследований [5, 7, 9]. Однако вопросы гидродинамики конденсации вторичного пара непосредственно в барометрических конденсаторах смесительного типа при форсуночном (капельном) диспергировании охлаждающей воды применительно к упариванию виноградного сока изучены недостаточно.

Идея данной работы заключается в кардинальном улучшении гидродинамики фаз барометрического конденсатора смесительного типа путем подачи охлаждающей воды через специализированные форсунки для создания развитого фазового контакта капельного типа. Цель исследования — интенсификация тепломассообмена и повышение энергоэффективности вакуум-выпарных установок при концентрировании виноградного сока за счет оптимизации гидродинамики фаз в барометрическом конденсаторе.

2. Материалы и методы

Экспериментальный стенд состоял из вакуум-выпарного аппарата емкостью 50 литров и модернизированного вертикального барометрического конденсатора смесительного типа. В качестве объекта упаривания использовался виноградный сок сорта «Кишмиш черный» (Brix = 16–18 %). Упаривание проводилось при давлении в системе 20 кПа.

В верхней части барометрического конденсатора взамен каскадных полок был установлен коллектор с центробежно-струйными форсунками (диаметр сопла d_c = 2,5; 3,5; 4,5 мм). Охлаждающая вода подавалась под избыточным давлением $\Delta P_ф$ = 0,1–0,3 МПа, обеспечивая факел распыла с углом раскрытия 60–75°.

Параметры контроля и измерений [4]:

1. Давление и вакуум: измерялись образцовыми вакуумметрами и датчиками давления с выводом на ПК.

2. Расход сред: расход сока и охлаждающей воды определялся электромагнитными расходомерами типа ЭРСУ.

3. Гидродинамика капель: средний диаметр сформированных форсункой капель (d_{32} — заутеровский диаметр) определялся расчетно-экспериментальным путем на основе угла распыла и перепада давления, а также верифицировался методом оптического зондирования.

Статистический анализ данных проводился методом ANOVA ($p < 0,05$).

3. Результаты и обсуждение

Форсуночный ввод охлаждающей воды коренным образом меняет фазовую гидродинамику внутри барометрического конденсатора. Вместо массивных струй с малой поверхностью теплообмена образуется высокодисперсный капельный поток («водяной туман»). Вторичный пар, поступающий из выпарного аппарата, мгновенно конденсируется на поверхности капель.

В таблице 1 приведены сравнительные характеристики гидродинамических режимов при различных давлениях подачи воды через форсунки (dc = 3,5 мм).

Таблица 1. Гидродинамические параметры капельного потока и эффективность конденсации вторичного пара

Режим / $\Delta P_ф$, МПа	**d_{32}, мм**	**Уд. поверхность контакта, м²/м³**	**Kv, Вт/(м³·К)**	**Т барометрической воды, °С**	**Ост. давление, кПа**
Полочный (базовый)	струйный режим	35	12400	41.2	24.5
Форсуночный (0.10)	2.1	95	15800	43.5	21.0
Форсуночный (0.20)	1.4	162	18900	45.8	18.2
Форсуночный (0.30)	0.9	210	19400	46.1	17.9

Как видно из таблицы 1, оптимальным является режим распыления при $\Delta P_ф$ = 0,20 МПа. При этом объемный коэффициент теплоотдачи Kv увеличивается на 52,4% по сравнению с базовым полочным аппаратом. Дальнейшее повышение давления до 0,30 МПа

ведет к избыточному измельчению капель (0,9 мм), что не вызывает существенного роста теплоотдачи, однако увеличивает риск уноса мелких капель вместе с неконденсирующимися газами в вакуум-насос [6].

Интенсификация процесса обусловлена тем, что мелкодисперсные капли обладают значительным запасом поверхностной энергии, а высокая относительная скорость фаз ($w_п$ - $w_к$) срывает тепловой пограничный слой с поверхности капли, ускоряя фазовый переход пар-жидкость [2].

Энергетический баланс выпарной установки производительностью 600 кг/ч по испаренной влаге показал высокую экономическую эффективность разработанного метода (таблица 2).

Таблица 2. Сравнительные показатели энергоэффективности узла барометрической конденсации

Показатель	Каскадно-полочный конденсатор	Разработанный форсуночный конденсатор
Уд. расход охлаждающей воды, кг/кг пара	28.5	21.2
Т охлаждающей воды на выходе, °C	41.2	45.8
Стабильность вакуума в системе, %	± 4.5	± 0.8
Уд. расход энергии на вакуумный насос, кВт·ч/т	16.2	12.8

** Снижение расхода воды на 25,6 %; повышение стабильности режима в 5,6 раза; экономия электроэнергии — 21,0 %.*

Меньший удельный расход охлаждающей воды объясняется тем, что за счет форсуночного распыления температура уходящей барометрической воды приближается к температуре насыщения вторичного пара (минимальный недогрев составляет всего 1,5–2,0 °C против 6–8 °C в полочных аналогах), что согласуется с данными по энергоэффективности вакуумных процессов концентрирования пищевых жидкостей [8, 10].

4. Заключение

1. Научно обоснован и разработан метод интенсификации смесительной конденсации вторичного пара при упаривании виноградного сока за счет оптимизации фазовой гидродинамики в барометрическом конденсаторе.

2. Доказано, что применение центробежно-струйных форсунок (оптимальный режим $\Delta P_ф$ = 0,2 МПа) позволяет создать развитую капельную структуру потока с удельной поверхностью контакта фаз до 162 м²/м³, что увеличивает объемный коэффициент теплоотдачи на 52,4 %.

3. Внедрение разработанного форсуночного метода в барометрический конденсатор обеспечивает снижение расхода охлаждающей воды на 25,6 % и сокращает энергопотребление вакуумной системы на 21,0 %.

Список литературы

1. Артыков А.А. Компьютерный инжиниринг химико-технологических систем: основы теории и практическое применение. – Ташкент: Мехнат, 2024. – 324 с.

2. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача: учебник для вузов. – 4-е изд. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.
3. Кутепов А.М., Стерман Л.С., Стюшин Н.Г. Гидродинамика и теплообмен при парообразовании: учеб. пособие для втузов. – 3-е изд. – М.: Высшая школа, 1986. – 448 с.
4. Шарипов Н.З., Исмоилов А.А., Ибрагимов Р.Р. Интенсификация процесса получения масла из ядра косточек вишни в поле сверхвысокочастотного тока // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. – 2025. – № 10 (139). – С. 39–42. – DOI: 10.32743/UniTech.2025.139.10.20929.
5. Bozkir H., Tekgül Y. Production of orange juice concentrate using conventional and microwave vacuum evaporation: thermal degradation kinetics of bioactive compounds and color values // Journal of Food Processing and Preservation. – 2022. – T. 46, № 6. – DOI: 10.1111/jfpp.15902.
6. Coulson J.M., Richardson J.F. Chemical Engineering: Fluid Flow, Heat Transfer and Mass Transfer. Volume 1. – 6th Edition. – Elsevier, 2019. – 890 P.
7. Ermolaev A.E., Krysanov K.S., Tekiev M.V., Silaev V.I., Zaseev S.G. Vacuum-evaporative method of juice concentration // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2022. – T. 954. – Art. 012028. – DOI: 10.1088/1755–1315/954/1/012028.
8. Hameed A., Maan A.A., Khan M.K.I., Khan I.M., Niazi S., Iqbal M.W., Riaz T., Manzoor M.F., Abdalla M. Evaporation kinetics and quality attributes of grape juice concentrate as affected by microwave and vacuum processing // International Journal of Food Properties. – 2023. – T. 26, № 1. – P. 1596–1611. – DOI: 10.1080/10942912.2023.2218062.
9. Piri A., Fanaei A.R., Rostampour V. Thermodynamic analysis of a continuous vacuum pan in the crystallization process of sugar beet syrup // Journal of Food Processing and Preservation. – 2024. – Art. 2245675. – DOI: 10.1155/2024/2245675.
10. Semenov E.V., Slavyanskiy A.A., Mitroshina D.P., Lebedeva N.N. Thermodynamic factor and vacuum crystallization // Foods and Raw Materials. – 2022. – T. 10, № 2. – P. 304–309. – DOI: 10.21603/2308-4057-2022-2-542.

References

1. Artykov A.A. Komp'yuternyy inzhiniring khimiko-tekhnologicheskikh sistem: osnovy teorii i prakticheskoe primenenie [Computer engineering of chemical-technological systems: fundamentals of theory and practical application]. Tashkent, Mekhnat Publ., 2012. 324 P. (In Russ.).
2. Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. Teploperedacha [Heat transfer]. 4th ed. Moscow, Energoizdat Publ., 1981. 416 P. (In Russ.).
3. Kutepov A.M., Sterman L.S., Styushin N.G. Gidrodinamika i teploobmen pri paroobrazovanii [Hydrodynamics and heat transfer during vaporization]. 3rd ed. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1986. 448 P. (In Russ.).

4. Sharipov N.Z., Ismoilov A.A., Ibragimov R.R. Intensifikatsiya protsessa polucheniya masla iz yadra kostochek vishni v pole sverkhvysokochastotnogo toka [Intensification of cherry kernel oil extraction process in an ultra-high frequency electric field]. Universum: tekhnicheskie nauki, 2025, no. 10(139), P. 39–42. DOI: 10.32743/UniTech.2025.139.10.20929. (In Russ.).
5. Bozkir H., Tekgül Y. Production of orange juice concentrate using conventional and microwave vacuum evaporation: thermal degradation kinetics of bioactive compounds and color values // Journal of Food Processing and Preservation. – 2022. – No. 6. – DOI: 10.1111/jfpp.15902.
6. Coulson J.M., Richardson J.F. Chemical Engineering: Fluid Flow, Heat Transfer and Mass Transfer. Volume 1. 6th ed. Elsevier, 2019. 890 P.
7. Ermolaev A.E., Krysanov K.S., Tekiev M.V., Silaev V.I., Zaseev S.G. Vacuum-evaporative method of juice concentration. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2022, vol. 954, art. 012028. DOI: 10.1088/1755–1315/954/1/012028.
8. Hameed A., Maan A.A., Khan M.K.I., Khan I.M., Niazi S., Iqbal M.W., Riaz T., Manzoor M.F., Abdalla M. Evaporation kinetics and quality attributes of grape juice concentrate as affected by microwave and vacuum processing. International Journal of Food Properties, 2023, vol. 26, no. 1, P. 1596–1611. DOI: 10.1080/10942912.2023.2218062.
9. Piri A., Fanaei A.R., Rostampour V. Thermodynamic analysis of a continuous vacuum pan in the crystallization process of sugar beet syrup // Journal of Food Processing and Preservation. – 2024. – Art. 2245675. – DOI: 10.1155/2024/2245675.
10. Semenov E.V., Slavyanskiy A.A., Mitroshina D.P., Lebedeva N.N. Thermodynamic factor and vacuum crystallization. Foods and Raw Materials, 2022, vol. 10, no. 2, P. 304–309. DOI: 10.21603/2308-4057-2022-2-542.

Статья поступила в редакцию: 04.10.2026
Статья принята к публикации: 20.10.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 633.18+664.7

DOI: 10.32743/UniTech.2026.151.10.23586

Исследование эффективного использования вторичного сырья риса: термическое разложение и структурные превращения рисовых отрубей при пиролизе

Рахматов Фуркат Эшпулат угли
преподаватель
Янгиерский филиал Ташкентского химико-технологического института
Республика Узбекистан, г. Янгиер
E-mail: furqatraxmatov176@gmail.com
Махмудова Дилдора Хасановна
доц.
Ташкентского химико-технологического институт
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: dildoramahmudiva@gmail.com
Азаматов Умид Зокирович
преподаватель
Янгиерский филиал Ташкентского химико-технологического института
Республика Узбекистан, г. Янгиер
E-mail: umidazamatov03@gmail.com
Шохрух Бекмирзаев Икром угли
преподаватель
Янгиерский филиал Ташкентского химико-технологического института
Республика Узбекистан, г. Янгиер
E-mail: shohruxbekmirzayev16@gmail.com
Рустамову Ферузу Мирзаахмедовну
студент
Янгиерский филиал Ташкентского химико-технологического института
Республика Узбекистан, г. Янгиер
E-mail: feruzarustamova@gmail.com
Тошпулатова Дилором Фуркат кизи
студент
Янгиерский филиал Ташкентского химико-технологического института
Республика Узбекистан, г. Янгиер
E-mail: latovadilorom1912@gmaol.com
Ёрматова Саодат Нарзулло кизи
студент
Янгиерский филиал Ташкентского химико-технологического института
Республика Узбекистан, г. Янгиер
E-mail: yormatovasaodat53@gmail.com

Библиографическое описание: Исследование эффективного использования вторичного сырья риса: термическое разложение и структурные превращения рисовых отрубей при пиролизе // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Рахматов Ф.Э.У. [и др.]. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23586

Research on the effective use of secondary rice raw materials: thermal decomposition and structural transformations of rice bran during pyrolysis

Raxmatov Furkat Eshpulat ugli
teacher
Yangiyer Branch of the Tashkent Institute of Chemical Technology
Republic of Uzbekistan, Yangiyer
Maxmudova Dildora Xasanovna
docent, Tashkent Institute of Chemical Technology
Republic of Uzbekistan, Tashkent
Azamatov Umid Zokirovich
teacher
Yangiyer Branch of the Tashkent Institute of Chemical Technology
Republic of Uzbekistan, Yangiyer
Bekmirzayev Shokhrux Ikrom ugli
teacher
Yangiyer Branch of the Tashkent Institute of Chemical Technology
Republic of Uzbekistan, Yangiyer
Rustamova Feruza Mirzaakhmadovna
student, Yangiyer Branch of the Tashkent Institute of Chemical Technology
Republic of Uzbekistan, Yangiyer
Toshpulatova Dilorom Furkat kizi
student, Yangiyer Branch of the Tashkent Institute of Chemical Technology
Republic of Uzbekistan, Yangiyer
Yormatova Saodat Narzullo kizi
student, Yangiyer Branch of the Tashkent Institute of Chemical Technology
Republic of Uzbekistan, Yangiyer

Аннотация

Цель работы — изучение закономерностей термического разложения рисовых отрубей и структурно-химических превращений, происходящих при их пиролизе, для оценки пригодности этого вида вторичного сырья в качестве предшественника углеродных материалов. В качестве объекта исследования использовали рисовые отруби, полученные на рисоперерабатывающем предприятии Сырдарьинской области. Температурный режим пиролиза выбирали на основании результатов термогравиметрического анализа, выполненного в интервале 45–1000 °C. Пиролиз проводили в трубчатой печи в токе азота при 950 °C; для сравнения в тех же условиях получен образец при 650 °C. Полученные образцы биоугля обозначены как RB-650 и RB-950. Исходное сырьё и биоуголь охарактеризованы методом ИК-Фурье-спектроскопии. Установлено, что термическое разложение рисовых отрубей протекает в четыре стадии с суммарной потерей массы 86,09 %; нелетучий остаток при 1000 °C составляет 13,91 %. Основная потеря массы (58,75 %) приходится на интервал 230–600 °C и связана с разложением гемицеллюлозы и целлюлозы; максимум скорости потери массы наблюдается при 285 °C. Выше 600 °C масса образца изменяется незначительно (6,39 % в интервале 600–1000 °C), что и определило выбор температуры пиролиза. ИК-Фурье-спектры подтверждают дегидратацию и глубокую карбонизацию сырья: полосы групп O–H, $–CH_2–$, C=O и C–O исчезают либо их интенсивность резко снижается, а спектр биоугля становится практически бесструктурным. Сделан вывод, что рисовые отруби

являются доступным возобновляемым сырьём для получения высококарбонизированного биоугля. Химическая активация биоугля гидроксидом калия, определение удельной поверхности и оценка водородной ёмкости составляют предмет дальнейших исследований.

Abstract

The aim of this work is to study the thermal decomposition of rice bran and the structural and chemical transformations occurring during its pyrolysis, in order to assess the suitability of this secondary raw material as a precursor for carbon materials. Rice bran from a rice-processing plant in the Syrdarya region was used as the object of study. The pyrolysis temperature was selected on the basis of thermogravimetric analysis carried out over the range 45–1000 °C. Pyrolysis was performed in a tube furnace under a nitrogen flow at 950 °C; a reference sample was also prepared at 650 °C under the same conditions. The resulting biochars are designated RB-650 and RB-950. The raw material and the biochar were characterised by Fourier-transform infrared spectroscopy. The thermal decomposition of rice bran proceeds in four stages with a total mass loss of 86.09 %, the non-volatile residue at 1000 °C being 13.91 %. The main mass loss (58.75 %) occurs in the range 230–600 °C and is associated with the decomposition of hemicellulose and cellulose, the maximum rate of mass loss being observed at 285 °C. Above 600 °C the sample mass changes only slightly (6.39 % over 600–1000 °C), which determined the choice of the pyrolysis temperature. The FTIR spectra confirm dehydration and deep carbonisation: the bands of O–H, $–CH_2–$, C=O and C–O groups disappear or decrease sharply and the biochar spectrum becomes virtually featureless. Rice bran is therefore an accessible renewable feedstock for highly carbonised biochar. Chemical activation with potassium hydroxide, specific surface area determination and the assessment of hydrogen capacity are the subject of further research.

Ключевые слова: рисовые отруби, вторичное сырьё, пиролиз, биоуголь, термогравиметрический анализ, ИК-Фурье-спектроскопия, карбонизация.

Keywords: rice bran, secondary raw material, pyrolysis, biochar, thermogravimetric analysis, FTIR spectroscopy, carbonisation.

Введение

В настоящее время снижение зависимости от ископаемых видов топлива и сокращение вредных выбросов в окружающую среду являются одними из наиболее актуальных задач. В этой связи большой интерес вызывает водород — экологически чистый энергоноситель, обладающий высокой гравиметрической плотностью энергии и образующий при сгорании только воду. Однако безопасное, эффективное и компактное хранение водорода остаётся основной проблемой, сдерживающей его широкое применение [14].

Среди способов хранения водорода особое значение имеет физическая адсорбция на пористых материалах как быстрый, обратимый и безопасный процесс [14]. Активированные углеродные материалы благодаря высокой удельной поверхности, развитой микропористой структуре, химической стабильности и низкой стоимости рассматриваются как перспективные адсорбенты водорода [2, 7]. В последние годы значительное внимание уделяется получению таких материалов из отходов растительного происхождения. Так, активированный углерод, полученный из ветвей зизифуса и дополнительно легированный

кислородом и азотом, обеспечивает поглощение водорода 2,62 мас. % при –196 °C и 0,1 МПа [1]; нанопористые углеродные материалы из кофейных отходов также проявляют заметную водородную ёмкость при 77 K [12]; для активированного углерода, полученного из биомассы папоротника Polypodium vulgare, достигнуто 2,73 мас. % при 25 °C и 4,5 МПа [11]. Углеродные материалы из стеблей кенафа, в свою очередь, демонстрируют высокие электрохимические характеристики в составе суперконденсаторов [13]. Приведённые данные свидетельствуют о широких возможностях использования растительных отходов в качестве предшественников функциональных углеродных материалов.

Одним из наиболее эффективных способов получения активированного углерода является химическая активация гидроксидом калия: KOH формирует в углеродном каркасе большое количество пор, что резко увеличивает удельную поверхность материала [6, 4]. При этом свойства получаемого материала во многом зависят от состава сырья и температуры предварительного пиролиза. Входящие в состав биомассы гемицеллюлоза, целлюлоза и лигнин разлагаются в разных температурных интервалах [3], поэтому режим пиролиза целесообразно выбирать на основании результатов термогравиметрического анализа [8, 10].

Рисовые отруби представляют собой мелкодисперсный побочный продукт рисоперерабатывающей промышленности, образующийся при шлифовании и полировании зерна после удаления наружной оболочки (рисовой шелухи). По химическому и минеральному составу отруби существенно отличаются от шелухи, которая отделяется на начальном этапе переработки зерна. Рисовые отруби образуются в значительных количествах, однако используются недостаточно полно, поэтому их превращение в углеродный материал с высокой добавленной стоимостью способствует решению как задачи утилизации отходов, так и задач энергетики.

Целью настоящей работы является изучение закономерностей термического разложения рисовых отрубей, обоснование температурного режима их пиролиза и исследование структурно-химических превращений сырья при пиролизе для оценки его пригодности в качестве предшественника углеродных материалов. Химическая активация полученного биоугля гидроксидом калия и оценка водородной ёмкости активированных образцов составляют содержание следующего этапа работы.

Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования использовали рисовые отруби, полученные на рисоперерабатывающем предприятии Сырдарьинской области (Республика Узбекистан). Сырьё представляло собой мелкодисперсный побочный продукт шлифования и полирования зерна риса. Для удаления пыли рисовые отруби промывали дистиллированной водой и с целью удаления избыточной влаги сушили в сушильном шкафу при температуре 80 °C в течение 12 ч. Высушенное сырьё измельчали и просеивали через сито с размером ячеек 1000 мкм; в дальнейших экспериментах использовали фракцию с размером частиц менее 1000 мкм.

Пиролиз проводили в трубчатой печи в токе азота (50 мл/мин). Образец нагревали со скоростью 10 °C/мин до 950 °C, выдерживали при этой температуре в течение 12 ч и затем охлаждали до комнатной температуры со скоростью 10 °C/мин. В тех же условиях для сравнения был получен образец при 650 °C. Полученные образцы биоугля обозначены как

RB-650 и RB-950; основным объектом дальнейшего исследования служил образец RB-950. Температуру пиролиза выбирали на основании результатов термогравиметрического анализа исходного сырья [8, 10] по следующему критерию: конечная температура пиролиза должна превышать температуру завершения основных стадий потери массы, что обеспечивает полное удаление летучих компонентов и формирование углеродного каркаса.

Особенности термического разложения рисовых отрубей изучали методом термогравиметрического анализа на приборе TGA Q5000 (TA Instruments, США) в интервале температур 45–1000 °C при скорости нагрева 10 °C/мин в токе азота (10 мл/мин). Измерения выполняли в открытом платиновом тигле; масса навески составляла около 4,8 мг. По кривым ТГ и ДТГ определяли температурные интервалы стадий разложения, потерю массы на каждой стадии, температуры максимумов скорости потери массы и нелетучий остаток при 1000 °C.

Функциональные группы на поверхности исходного сырья и биоугля определяли методом ИК-Фурье-спектроскопии на спектрометре Nicolet iS10 (Thermo Fisher Scientific, США), оснащённом приставкой нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) Smart iTR с алмазным кристаллом. Спектры регистрировали в диапазоне 4000–600 $см^{-1}$ с разрешением 4 $см^{-1}$ при накоплении 32 сканов. Отнесение полос поглощения выполняли в соответствии с литературными данными для биоугля, полученного из рисовых отрубей [5].

Все измерения выполняли в трёхкратной повторности на представительных пробах усреднённых образцов; в работе приведены типичные кривые ТГ и ДТГ, а также типичные ИК-Фурье-спектры исходного сырья и полученного биоугля.

Результаты и обсуждение

Кривые ТГ и ДТГ исходных рисовых отрубей представлены на рис. 1, численные результаты термогравиметрического анализа приведены в табл. 1. Потеря массы протекает в четыре стадии. Первая стадия (45–130 °C) связана с удалением влаги и составляет 6,74 % от общей массы; максимум скорости потери массы наблюдается при 55 °C. На второй стадии (130–230 °C) теряется 14,21 % массы с максимумом скорости потери массы при 200 °C, что обусловлено удалением структурной воды и началом разложения наименее термостабильных компонентов биомассы — гемицеллюлозы и лигнина. Согласно литературным данным, лигнин представляет собой биополимер с развитой сеткой ароматических колец, связанных различными типами химических связей, вследствие чего его разложение начинается уже около 100 °C, протекает медленно и продолжается вплоть до 900 °C [3]. Третья стадия (230–600 °C) является основной: в результате разложения гемицеллюлозы и целлюлозы теряется 58,75 % массы, а максимум скорости потери массы наблюдается при 285 °C. Согласно литературным данным, гемицеллюлоза разлагается преимущественно в интервале 220–315 °C, а целлюлоза — в интервале 315–400 °C с образованием неконденсируемых газов и конденсируемых органических паров [3]. Четвёртая стадия (600–1000 °C) составляет 6,39 % и связана с продолжающимся удалением углеродсодержащих компонентов и дальнейшим разложением лигнина. Суммарная потеря массы достигает 86,09 %, а нелетучий остаток при 1000 °C составляет 13,91 %, что обусловлено образовавшимся углеродным каркасом и минеральной (зольной) составляющей сырья. Суммарная потеря

массы, определённая непосредственно по ТГ-кривой во всём интервале 45–1000 °C, составляет 85,89 % (4,129 мг); расхождение в 0,2 % связано с выбором границ отдельных стадий.

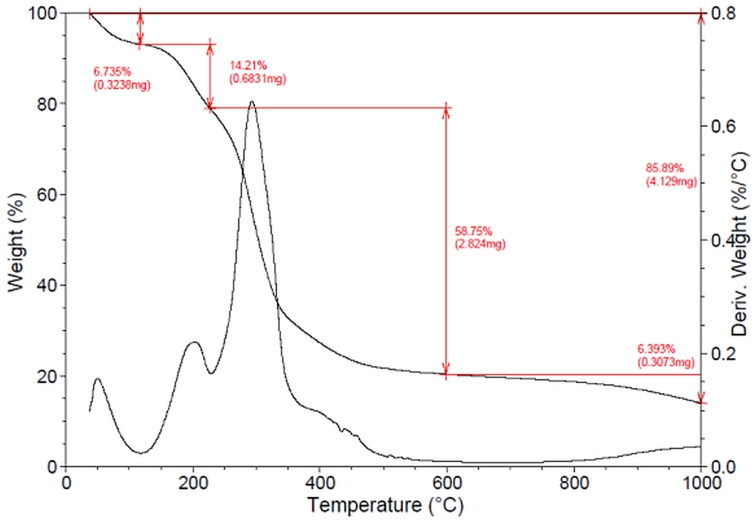


Рисунок 1. Кривые ТГ и ДТГ рисовых отрубей в интервале температур 45–1000 °C

Таблица 1. Результаты термогравиметрического анализа рисовых отрубей

№	Температурный интервал, °C	Потеря, %	Потеря, мг	Итого, %	Пик ДТГ, °C
1	45–130	6,74	0,324	6,74	55
2	130–230	14,21	0,683	20,95	200
3	230–600	58,75	2,824	79,70	285
4	600–1000	6,39	0,307	86,09	–
	Остаток при 1000 °C	13,91	0,669	–	–

Таким образом, выше 600 °C скорость потери массы становится незначительной: в интервале 600–1000 °C теряется лишь 6,39 % массы, то есть основные процессы термического разложения к этой температуре завершаются. В соответствии с принятым критерием в качестве температур пиролиза были выбраны 650 °C (температура достижения практически постоянной массы) и 950 °C (максимальная температура обработки): при этих температурах от исходного материала остаётся преимущественно углеродный каркас биоугля и минеральная (зольная) часть.

Функциональные группы на поверхности исходного сырья и биоугля определяли методом ИК-Фурье-спектроскопии. FTIR-спектры образцов до и после пиролиза представлены на рис. 2, а отнесение характеристических полос поглощения исходных рисовых отрубей приведено в табл. 2. Спектры образцов RB-650 и RB-950 существенно упрощены по сравнению со спектром исходного сырья и практически лишены выраженных полос поглощения, что связано с исчезновением большинства кислородсодержащих функциональных групп в результате карбонизации. Широкая полоса с минимумом около 3260 $см^{-1}$, относящаяся к валентным колебаниям O–H целлюлозы, гемицеллюлозы, лигнина и адсорбированной воды, после пиролиза практически исчезает.

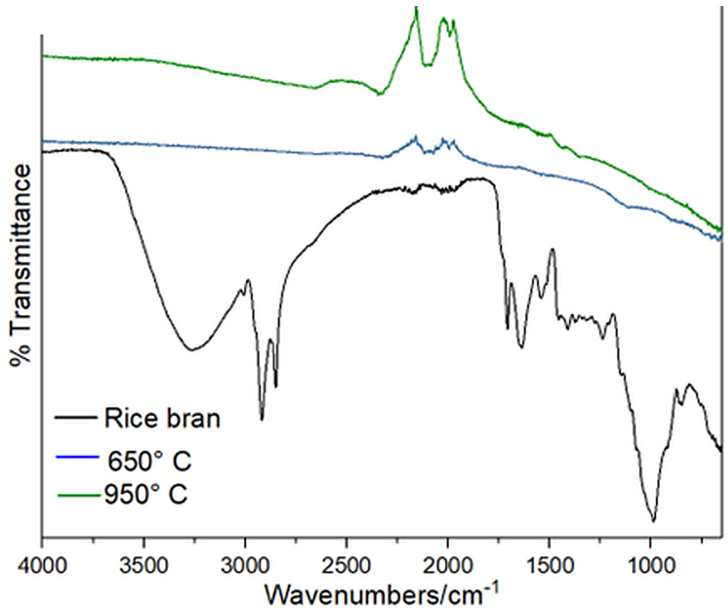


Рисунок 2. FTIR-спектры исходных рисовых отрубей и биоугля, полученного при 650 и 950 °C

Таблица 2. Отнесение полос поглощения в FTIR-спектре рисовых отрубей

№	Область	Волновое число, см⁻¹	Тип колебаний и отнесение
1	Одинарные связи (4000–2500)	~3260	валентные колебания O–H (целлюлоза, гемицеллюлоза, лигнин, адсорбированная вода)
2	Одинарные связи (4000–2500)	~2920 и ~2850	асимметричные и симметричные валентные колебания алифатических групп $–CH_2–$, $–CH_3$ (липидная фракция отрубей, целлюлоза, гемицеллюлоза, лигнин)
3	Тройные связи (2500–2000)	~2350–2000	область C≡C, C≡N; как правило, поглощение CO_2 и кристалла НПВО
4	Двойные связи (2000–1500)	~1745	валентные колебания C=O сложноэфирных групп (триглицериды рисового масла, ацетильные группы гемицеллюлозы)
5	Двойные связи (2000–1500)	~1650–1600	C=O / ароматические C=C, адсорбированная вода
6	«Отпечатки пальцев» (1500–500)	~1500–1400	валентные колебания C–C ароматических структур лигнина
7	«Отпечатки пальцев» (1500–500)	~1450–1240	валентные колебания C–O сложноэфирных и карбоксильных групп лигнина
8	«Отпечатки пальцев» (1500–500)	~990	валентные колебания C–O–C и C–O микрокристаллической целлюлозы
9	«Отпечатки пальцев» (1500–500)	~850	колебания Si–O–Si (минеральная составляющая отрубей)

Полученные результаты свидетельствуют о дегидратации биомассы. Интенсивные полосы при 2920 и 2850 $см^{-1}$, относящиеся к асимметричным и симметричным валентным колебаниям алифатических групп $–CH_2–$ и $–CH_3$ и обусловленные прежде всего липидной фракцией отрубей, после пиролиза полностью исчезают. Исчезает также полоса около 1745 $см^{-1}$, характерная для валентных колебаний C=O сложноэфирных групп (триглицериды рисового масла, ацетильные группы гемицеллюлозы). В области 2350–2000 $см^{-1}$ наблюдаются слабые полосы, относящиеся к группам C≡C и C≡N; в этой же области проявляется

поглощение диоксида углерода и кристалла НПВО, вследствие чего соответствующие сигналы присутствуют во всех спектрах. Полосы в области 1650–1600 $см^{-1}$, относящиеся к колебаниям C=O и ароматических связей C=C, а также полосы в области 1500–1400 $см^{-1}$, обусловленные колебаниями C–C ароматических структур лигнина, после пиролиза исчезают. Полосы сложноэфирных и карбоксильных групп лигнина в области 1450–1240 $см^{-1}$ сглаживаются, а интенсивная полоса около 990 $см^{-1}$, характерная для валентных колебаний C–O–C и C–O микрокристаллической целлюлозы, практически исчезает. Слабая полоса около 850 $см^{-1}$, обусловленная колебаниями Si–O–Si, отражает присутствие минеральной составляющей отрубей; её невысокая интенсивность согласуется с тем, что минеральная часть рисовых отрубей, в отличие от рисовой шелухи, представлена преимущественно соединениями фосфора, калия и магния при относительно низком содержании кремнезёма, и соответствует меньшей величине нелетучего остатка (13,91 %). Спектры образцов RB-650 и RB-950 близки между собой, что свидетельствует о завершении основных процессов карбонизации уже при 650 °C.

Совокупность полученных данных показывает, что при 950 °C из рисовых отрубей формируется глубоко карбонизированный материал, который может быть использован в качестве предшественника при получении активированного углерода. Химическая активация биоугля RB-950 гидроксидом калия при массовых соотношениях KOH: биоуголь 2:1 и 6:1 [6, 4], определение удельной поверхности, объёма и распределения пор по изотермам адсорбции азота с соблюдением современных требований к воспроизводимости расчётов по методу BET [9], а также измерение изотерм «давление – состав – температура» и водородной ёмкости при 77 K [2, 7] составляют предмет следующего этапа исследований.

Заключение

В данной работе из рисовых отрубей, полученных на рисоперерабатывающем предприятии Сырдарьинской области, методом пиролиза при 950 °C получен биоуголь, структура и состав которого изучены методами термогравиметрического анализа (ТГА) и ИК-Фурье-спектроскопии.

Термогравиметрический анализ показал, что термическое разложение рисовых отрубей протекает в четыре стадии. На первой стадии (45–130 °C) удаляется влага (6,74 %). На второй стадии (130–230 °C) происходит удаление структурной воды и начинается разложение наименее термостабильных компонентов биомассы (14,21 %). На третьей стадии (230–600 °C) разлагаются гемицеллюлоза и целлюлоза (58,75 %). На четвёртой стадии (600–1000 °C) удаляются оставшиеся углеродсодержащие компоненты (6,39 %). Суммарная потеря массы составила 86,09 %, нелетучий остаток при 1000 °C — 13,91 %. Поскольку выше 600 °C основные процессы разложения завершаются, для пиролиза были выбраны температуры 650 и 950 °C, гарантирующие полное удаление летучих компонентов.

По данным ИК-Фурье-спектроскопии в процессе пиролиза полосы, характерные для групп O–H, $–CH_2–$, C=O и C–O, исчезают либо их интенсивность резко снижается, а спектр биоугля становится практически бесструктурным, что подтверждает дегидратацию

и глубокую карбонизацию биомассы. Сохранение слабой полосы Si–O–Si указывает на присутствие минеральной составляющей сырья и согласуется с величиной нелетучего остатка.

Полученные результаты показывают, что рисовые отруби являются доступным и перспективным сырьём для получения высококарбонизированного биоугля. Химическая активация полученного биоугля гидроксидом калия, определение его текстурных характеристик (удельной поверхности, объёма и распределения пор) и оценка водородной ёмкости при 77 K будут представлены в последующих публикациях.

Список литературы

1. Anuchitsakol S., Dilokekunakul W., Khongtor N., Chaemchuen S., Klomkliang N. Combined experimental and simulation study on H2 storage in oxygen and nitrogen co-doped activated carbon derived from biomass waste: superior pore size and surface chemistry development // RSC Advances. – 2023. – T. 13, № 51. – P. 36009–36022.
2. Blankenship L.S., Mokaya R. Modulating the porosity of carbons for improved adsorption of hydrogen, carbon dioxide, and methane: a review // Materials Advances. – 1930. – T. 3, № 4. – P. 1905–1930.
3. Chen D., Cen K., Zhuang X. et al. Insight into biomass pyrolysis mechanism based on cellulose, hemicellulose, and lignin: Evolution of volatiles and kinetics, elucidation of reaction pathways, and characterization of gas, biochar and bio-oil // Combustion and Flame. – 2022. – T. 242. – Art. 112142.
4. Illingworth J.M., Rand B., Williams P.T. Understanding the mechanism of two-step, pyrolysis-alkali chemical activation of fibrous biomass for the production of activated carbon fibre matting // Fuel Processing Technology. – 2022. – T. 235. – Art. 107348.
5. Kim D.-Y., Jung G.-B. Effects of Pyrolysis and Ball-Milling on the Physicochemical and Rhodamine B Removal Characteristics of Rice-Bran-Derived Biochar // Applied Sciences. – 2023. – T. 13, № 7. – Art. 4288.
6. Li C., Li Y., Shao Y. et al. Activation of biomass with volatilized KOH // Green Chemistry. – 2023. – T. 25, № 7. – P. 2825–2839.
7. Mahmoud L.A.M., Rowlandson J.L., Fermin D.J., Ting V.P., Nayak S. Porous carbons: a class of nanomaterials for efficient adsorption-based hydrogen storage // RSC Applied Interfaces. – 2025. – T. 2, № 1. – P. 25–55.
8. Mishra R.K., Naik S.U., Chistie S.M., Kumar V., Narula A. Pyrolysis of agricultural waste in a thermogravimetric analyzer: Studies of physicochemical properties, kinetics behaviour, and gas compositions // Materials Science for Energy Technologies. – 2022. – T. 5. – P. 399–410.
9. Osterrieth J.W.M., Rampersad J., Madden D. et al. How Reproducible are Surface Areas Calculated from the BET Equation? // Advanced Materials. – 2022. – T. 34, № 27. – Art. 2201502.
10. Safarian S. Performance analysis of sustainable technologies for biochar production: A comprehensive review // Energy Reports. – 2023. – T. 9. – P. 4574–4593.

11. Serafin J., Dziejarski B., Solis C. Ramírez de la Piscina P., Homs N. Medium-pressure hydrogen storage on activated carbon derived from biomass conversion // Fuel. – 2024. – T. 363. – Art. 130975.
12. Stock S., Kostoglou N., Selinger J. et al. Coffee Waste-Derived Nanoporous Carbons for Hydrogen Storage // ACS Applied Energy Materials. – 2022. – T. 5, № 9. – P. 10915–10926.
13. Subramaniam T., Ansari M.N.M., Krishnan S.G., Khalid M. Kenaf-based activated carbon: A sustainable solution for high-performance aqueous symmetric supercapacitors // Chemosphere. – 2024. – T. 354. – Art. 141593.
14. Usman M.R. Hydrogen storage methods: Review and current status // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2022. – T. 167. – Art. 112743.

Статья поступила в редакцию: 01.10.2026
Статья принята к публикации: 08.10.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 66.047+664.8+620.9

Импульсные режимы виброконвективной сушки чеснока как резерв снижения удельных энергозатрат: расчётно-теоретическое обоснование

Сафаров Жасур Эсиргапович
д-р техн. наук, проф.
Ташкентский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: jasursafarov@yahoo.com

Султанова Шахноза Абдувахитовна
д-р техн. наук, проф.
Хокимият города Ташкента
Ташкентский государственный технический университет,
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Миркомилов Абдурахмон Мираббос угли
PhD
Ташкентский химико-технологический институт,
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: sh.sultanova@yahoo.com

Intermittent modes of vibro-convective garlic drying as a means of reducing specific energy consumption: computational and theoretical justification

Safarov Jasur Esirgapovich
doctor of Technical Sciences, Professor
Tashkent State Technical University
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Sultanova Shakhnoza Abduvakhitovna
Doctor of Technical Sciences, Professor
Tashkent City Administration
Tashkent State Technical University,
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Mirkomilov Abdurakhmon Mirabbos ugli
PhD
Tashkent Institute of Chemical Technology,
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Библиографическое описание: Сафаров Ж.Э., Султанова Ш.А., Миркомилов А.М.У. Импульсные режимы виброконвективной сушки чеснока как резерв снижения удельных энергозатрат: расчётно-теоретическое обоснование // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23518

Аннотация

На основе обобщённой математической модели тепломассопереноса при виброконвективной сушке, учитывающей усадку и виброускорение, выполнено расчётно-теоретическое исследование импульсных режимов сушки ломтиков чеснока: импульсной и ступенчатой вибрации, импульсных нагрева с периодами отлёжки, ступенчатого снижения температуры агента сушки и их комбинаций. Модель дополнена расписаниями воздействий, граничными условиями периода отлёжки, относительными показателями энергозатрат, учитывающими доли мощности калорифера, вентилятора и вибропривода, и кинетикой потерь аллицина второго порядка с аррениусовской зависимостью константы от расчётной температуры продукта. Установлено, что при доле мощности вибропривода 5–15 % прерывание вибрации при Г = 1 не даёт экономии, тогда как при Г = 3 ступенчатое снижение виброускорения после первого периода сушки уменьшает удельные энергозатраты на 29 %; импульсный нагрев с коэффициентом заполнения δ = 0,5–0,67 и периодом 20–30 мин снижает удельные энергозатраты на 6–12 % при увеличении общей продолжительности цикла на 38–71 %; ступенчатый режим 70 → 55 °C обеспечивает наибольшую расчётную сохранность аллицина при энергозатратах на уровне непрерывного режима. Даны рекомендации по выбору режима в зависимости от приоритета энергозатрат, производительности и качества.

Abstract

Based on the generalized mathematical model of heat and mass transfer in vibro-convective drying that accounts for shrinkage and vibration acceleration, a computational study of intermittent (pulsed) regimes of garlic slice drying was carried out: pulsed and stepped vibration, intermittent heating with tempering periods, step-down of the drying air temperature and their combinations. The model was supplemented with actuation schedules, boundary conditions for the tempering period, relative energy indicators that account for the power shares of the heater, fan and vibration drive, and second-order allicin loss kinetics with an Arrhenius dependence of the rate constant on the calculated product temperature. It was found that at a vibration-drive power share of 5–15 % interrupting the vibration at Г = 1 gives no saving, whereas at Г = 3 a stepwise reduction of the vibration acceleration after the first drying period reduces the specific energy consumption by 29 %; intermittent heating with a duty cycle δ = 0.5–0.67 and a period of 20–30 min reduces the specific energy consumption by 6–12 % while increasing the total cycle duration by 38–71 %; the step-down regime 70 → 55 °C provides the highest calculated allicin retention at an energy consumption equal to that of the continuous regime. Recommendations are given for selecting the regime depending on the priority of energy consumption, throughput and quality.

Ключевые слова: виброконвективная сушка, чеснок, импульсный сушка, импульсная вибрация, отлёжка, удельные энергозатраты, аллицин.

Keywords: vibro-convective drying, garlic, intermittent drying, pulsed vibration, tempering, specific energy consumption, allicin.

Введение

Энергосберегающая виброконвективная технология сушки чеснока [10], оптимальные параметры процесса [11] и усовершенствованная конструкция установки [7] разработаны для непрерывного режима, при котором нагрев агента сушки и вибрация поддона осуществляются постоянно в течение всего цикла. Вместе с тем в теории сушки известно, что периодическое прерывание подвода энергии – импульсная сушка – позволяет использовать периоды отлёжки для перераспределения влаги внутри материала, вследствие чего последующий подвод теплоты реализуется с большей эффективностью, а суммарные энергозатраты и термическое повреждение продукта снижаются [2, 5]. При импульсно-вакуумной сушке ломтиков чеснока, обеспечившей наибольшее содержание аллицина среди сравниваемых технологий [12].

Особенность виброконвективной сушки состоит в том, что помимо нагрева прерываться может и вибрационное воздействие. Поскольку мощность вибропривода растёт пропорционально квадрату виброускорения [8], а вклад вибрации в скорость сушки наиболее велик в первом периоде, когда лимитирующим является внешнее сопротивление массопереносу, возникает вопрос о целесообразности импульсной или ступенчатой вибрации. Кроме того, для чеснока температурный режим ограничен кинетикой потерь аллицина – реакцией второго порядка с энергией активации 25,48 кДж/моль [4], причём потери резко возрастают выше 60 °C [9], что делает импульсный и ступенчатые температурные режимы потенциально выгодными и с точки зрения качества.

Цель настоящей работы – расчётно-теоретическое обоснование резерва снижения удельных энергозатрат при виброконвективной сушке чеснока за счёт импульсных режимов вибрации и нагрева на основе обобщённой математической модели тепломассопереноса с учётом усадки и виброускорения [1].

Математическая модель и её дополнение для импульсных режимов

В основу положена разработанная ранее обобщённая модель [1], в которой ломтик чеснока рассматривается как пластина с подвижной границей, а влагоперенос в нормированной координате Ландау $\xi = z/L(t)$ описывается уравнением

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{D_{eff}}{L^2}\frac{\partial^2 X}{\partial \xi^2} + \frac{\xi}{L}\frac{dL}{dt}\frac{\partial X}{\partial \xi}, \quad L(t) = L_0\left[1 - k_{sh}\frac{X_0 - \bar{X}}{X_0}\right], \tag{1}$$

с граничным условием третьего рода на поверхности и сосредоточенным тепловым балансом ломтика; коэффициент диффузии зависит от температуры по Аррениусу, а коэффициенты внешнего переноса — от скорости агента сушки и безразмерного виброускорения $\Gamma = A(2\pi f)^2/g$ через множитель $(1 + a\Gamma^{*n^*})$. Численная схема модели верифицирована по аналитическому решению Крэнка с отклонением не более 0,09 % [1]. Теплофизические параметры и параметры вибрационной интенсификации приняты такими же, как в [1] (табл. 1); в качестве базового выбран режим T_a = 60 °C, v = 2 м/с, лежащий в диапазоне сохранности аллицина [4, 9] и рекомендованный по результатам оптимизации виброконвективной сушки [11].

Расписания воздействий. Импульсный режим задаётся кусочно-постоянными функциями времени: индикатором нагрева $s_h(t) \in \{0; 1\}$, индикатором работы вентилятора $s_f(t)$, температурой агента сушки $T_a(t)$ и виброускорением $\Gamma(t)$. Для периодических режимов с периодом P и коэффициентом заполнения δ

$$s_h(t) = \{1,\ t \bmod P < \delta P;\ \ 0,\ t \bmod P \geq \delta P\}, \qquad \Gamma(t) = \Gamma_{on} s_v(t), \tag{2}$$

где $s_v(t)$ — индикатор вибрации, задаваемый по аналогии с (2) со своими периодом и коэффициентом заполнения либо ступенчато (Γ_1 до момента t_1, далее Γ_2). Ступенчатый температурный режим задаётся как $T_a(t) = T_1$ при $t < t_1$ и T_2 при $t \geq t_1$.

Условия периода отлёжки. При выключенном нагреве ($s_h = 0$) ломтик находится в неподвижном воздухе помещения с температурой T_{amb} и повышенной относительной влажностью, поэтому коэффициенты внешнего переноса и равновесное влагосодержание переключаются на значения, соответствующие естественной конвекции:

$$\beta(t) = s_h \beta_0 (1 + a\Gamma^n) + (1 - s_h)\beta_{nat}, \quad h(t) = s_h h_0 (1 + a\Gamma^n) + (1 - s_h) h_{nat}, \tag{3}$$

$$X_e(t) = s_h X_{e,dry} + (1 - s_h) X_{e,amb}, \quad T_a(t) = s_h T_{a,on} + (1 - s_h) T_{amb}. \tag{4}$$

Показатели энергозатрат. Абсолютные энергозатраты зависят от конструкции конкретной установки, поэтому режимы сопоставлялись по относительному показателю, построенному на долях мощности калорифера α_h, вентилятора α_f и вибропривода α_v в суммарной мощности непрерывного виброконвективного режима при $T_a = 60$ °C и $\Gamma = 1$:

$$E = \int_0^{\tau_d} \left[\alpha_h \theta(t) s_h(t) + \alpha_f s_f(t) + \alpha_v \Gamma(t)^2\right] dt, \quad \theta(t) = \frac{T_a(t) - T_{amb}}{60 - T_{amb}}, \tag{5}$$

$$\frac{SEC}{SEC_1} = \frac{E}{E_1}, \qquad \Delta\tau = \frac{\tau_d}{\tau_{d,1}} - 1, \tag{6}$$

где θ(t) учитывает пропорциональность мощности калорифера перепаду температур при постоянном расходе воздуха; индекс 1 относится к непрерывному виброконвективному режиму ($\Gamma = 1$), принятому за эталон сравнения; Δτ – относительное увеличение продолжительности цикла, характеризующее потерю производительности. Поскольку удаляемая масса влаги одинакова во всех вариантах, отношение энергий равно отношению удельных энергозатрат. Базовые доли αh = 0,70, αf = 0,20, αv = 0,10 приняты по типичной структуре энергопотребления конвективных сушилок с электрокалорифером; их влияние оценено в анализе чувствительности.

Оценка сохранности аллицина. Для сопоставления режимов по качеству использована кинетика потерь аллицинового потенциала второго порядка, установленная для конвективной сушки ломтиков чеснока [4], с аррениусовской зависимостью константы скорости от расчётной температуры продукта $T(t)$:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{1}{AP}\right) = k(T), \quad k(T) = k_{ref} \exp\left[-\frac{E_{AP}}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right], \quad \eta_{AP} = \frac{AP(\tau_d)}{AP_0} \cdot 100\ \%, \tag{7}$$

где kref = 2,91·10−4 г/(мг·мин) при Tref = 60 °C и EAP = 25,48 кДж/моль рассчитаны по данным [4]. Использование расчётной температуры продукта вместо температуры агента сушки позволяет учесть испарительное охлаждение ломтика и его остывание в периоды отлёжки.

Таблица 1. Основные параметры модели и расчётных режимов

Параметр	Значение	Источник / обоснование
Полутолщина ломтика L_0; X_0; $X_{e,dry}$; X_f	1,5 мм; 1,60; 0,05; 0,08 кг/кг	[4]
D_{eff}(60 °C); E_a; k_{sh}	$4{,}0\cdot10^{-10}$ м²/с; 25 кДж/моль; 0,45	[4], [12]
Параметры вибрационной интенсификации a; n; Bi_{m0}	0,4; 0,5; 2,5	[4]
Агент сушки T_a; v; T_{amb}	60 (55; 70) °C; 2 м/с; 20 °C	[2, 9, 10]
Условия отлёжки: h_{nat}; β_{nat}/β_0; $X_{e,amb}$	5 Вт/(м²·К); 0,15; 0,12 кг/кг	естественная конвекция, φ ≈ 50 %
Доли мощности α_h; α_f; α_v (Г = 1)	0,70; 0,20; 0,10	принято; варьируется 0,60–0,80
Кинетика аллицина k_{ref}; E_{AP}; AP_0	$2{,}91\cdot10^{-4}$ г/(мг·мин); 25,48 кДж/моль; 10,91 мг/г	[9]
Периоды и коэффициенты заполнения	P = 10–60 мин; δ = 0,4–1,0	диапазон [5, 6]

Расчётные варианты режимов

Диаграммы воздействий для четырёх характерных вариантов показаны на рис. 1. Дополнительно выполнено параметрическое исследование импульсный нагрева при P = 20, 30 и 60 мин и δ = 0,4–1,0.

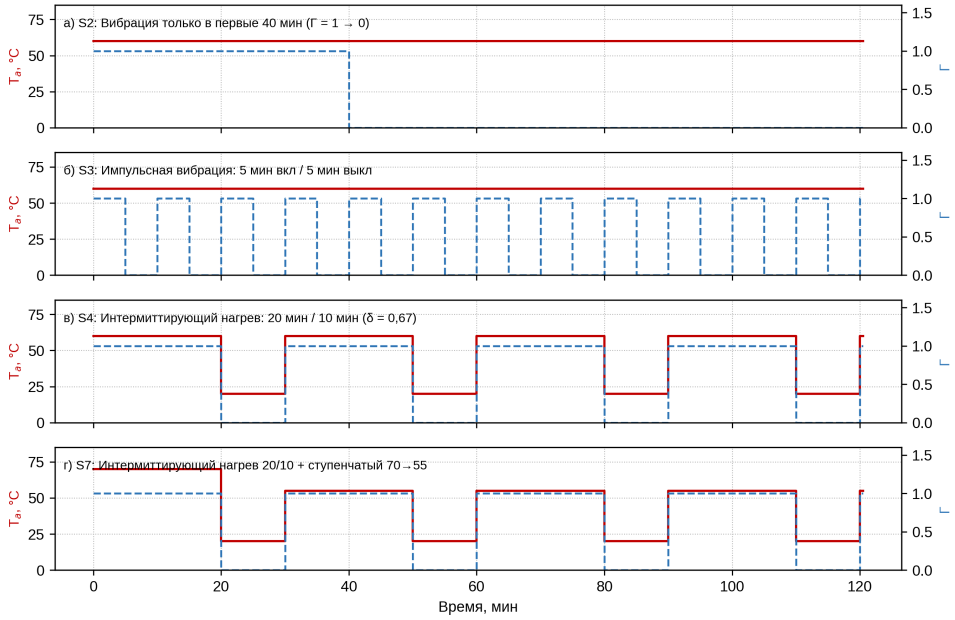


Рисунок 1. Диаграммы воздействий для вариантов S2, S3, S4 и S7: температура агента сушки Ta(t) (сплошная линия, левая ось) и виброускорение Г(t) (штриховая линия, правая ось)

Таблица 2. Расчётные варианты режимов виброконвективной сушки (v = 2 м/с)

Вариант	Описание режима	T_a, °C	Вибрация
S0	Непрерывная конвективная сушка (эталон конвективного способа)	60	Г = 0
S1	Непрерывная виброконвективная сушка (эталон, SEC_1)	60	Г = 1
S2	Вибрация только в первом периоде: Г = 1 в течение 40 мин, далее Г = 0	60	1 → 0
S3	Импульсная вибрация: 5 мин включена / 5 мин выключена (δ_v = 0,5)	60	Г = 1 / 0
S4	импульсный нагрев: 20 мин нагрев / 10 мин отлёжка (P = 30 мин, δ = 0,67)	60 / 20	Г = 1 / 0
S5	импульсный нагрев: 15 мин / 15 мин (P = 30 мин, δ = 0,5)	60 / 20	Г = 1 / 0
S6	Ступенчатый температурный режим: 70 °C в течение 30 мин, далее 55 °C	70 → 55	Г = 1
S7	Комбинация S4 и S6: импульсный нагрев 20/10 мин при 70 → 55 °C	70 → 55 / 20	Г = 1 / 0
S8	Непрерывная виброконвективная сушка при высоком виброускорении	60	Г = 3
S9	Ступенчатая вибрация: Г = 3 в течение 30 мин, далее Г = 1	60	3 → 1
S10	Ступенчатая вибрация: Г = 3 в течение 30 мин, далее Г = 0	60	3 → 0

Результаты и их обсуждение

Эталонные и вибрационные режимы. Причина в том, что каждая минута простоя вибропривода экономит лишь 10 % мощности, тогда как вызванное этим удлинение сушки увеличивает потребление калорифера и вентилятора (90 % мощности). Следовательно, при умеренном виброускорении вибрация должна быть непрерывной.

Картина меняется при высоком виброускорении. Этот результат подтверждает физическую предпосылку: интенсивная вибрация целесообразна лишь в первом периоде сушки, когда влагосодержание поверхности велико и лимитирующим является внешнее сопротивление массопереносу [3]; по мере перехода процесса в область внутреннего диффузионного контроля дальнейшее увеличение β не ускоряет сушку, а мощность вибропривода расходуется впустую.

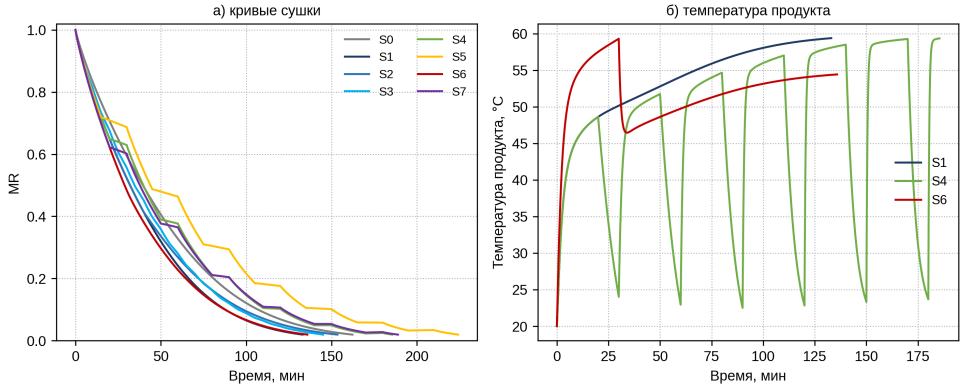


Рисунок 2. Кривые сушки для вариантов S0–S7 (а) и температура продукта для непрерывного (S1), импульсный (S4) и ступенчатого (S6) режимов (б)

Таблица 3. Расчётные показатели режимов виброконвективной сушки ломтиков чеснока до Xf = 0,08 кг/кг

Вариант	τ_d, мин	Время нагрева, мин	SEC/SEC$_1$	Δτ, %	η_{AP}, %	Средняя *T* продукта, °C
S0	162,2	162,2	1,098	+22	70,3	52,5
S1	133,0	133,0	1,000	+0	73,8	53,5
S2	153,4	153,4	1,069	+15	70,9	53,5
S3	145,0	145,0	1,038	+9	72,3	53,1
S4	185,4	125,4	0,943	+39	70,5	46,6
S5	224,1	119,1	0,896	+69	69,2	41,5
S6	135,8	135,8	0,991	+2	74,3	51,9
S7	188,9	128,9	0,924	+42	71,4	44,8
S8	120,2	120,2	1,627	−10	75,4	54,0
S9	129,7	129,7	1,156	−2	74,0	53,9
S10	151,5	151,5	1,229	+14	71,0	53,8

Импульсный нагрев. Периоды отлёжки, в течение которых выключаются калорифер, вентилятор и вибропривод, обеспечивают реальную экономию: в варианте S4 (20 мин нагрев / 10 мин отлёжка) время работы калорифера сокращается со 133,0 до 125,4 мин, энергозатраты — до 0,94 (экономия 5,7 %), а общая продолжительность цикла возрастает до 185,4 мин (Δτ = +39 %). Механизм экономии виден на рис. 2, б: в период отлёжки продукт остывает до 23–25 °C, влага перераспределяется от центра к поверхности, часть её испаряется в окружающий воздух без затрат энергии, а после включения нагрева скорость сушки на короткое время возвращается к уровню первого периода. Показательно, что относительные энергозатраты S4 и S5 не зависят от долей мощности α (табл. 4), поскольку в период отлёжки выключаются все потребители одновременно.

Параметрическое исследование (рис. 3) показывает монотонное снижение энергозатрат с уменьшением коэффициента заполнения δ: при P = 20 мин экономия составляет 5,3 % при δ = 0,75, 6,8 % при δ = 0,67, 11,6 % при δ = 0,5 и 14,1 % при δ = 0,4; однако продолжительность цикла возрастает при этом до 165,9, 183,9, 227,5 и 282,3 мин соответственно.

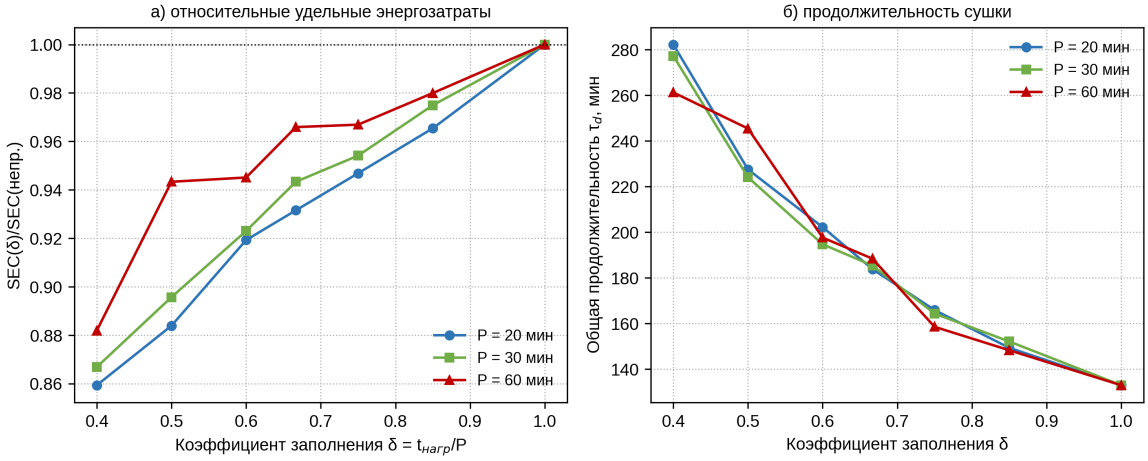


Рисунок 3. Относительные удельные энергозатраты (а) и продолжительность сушки (б) при импульсный нагреве в зависимости от коэффициента заполнения δ при различных периодах P; Ta = 60 °C, Г = 1

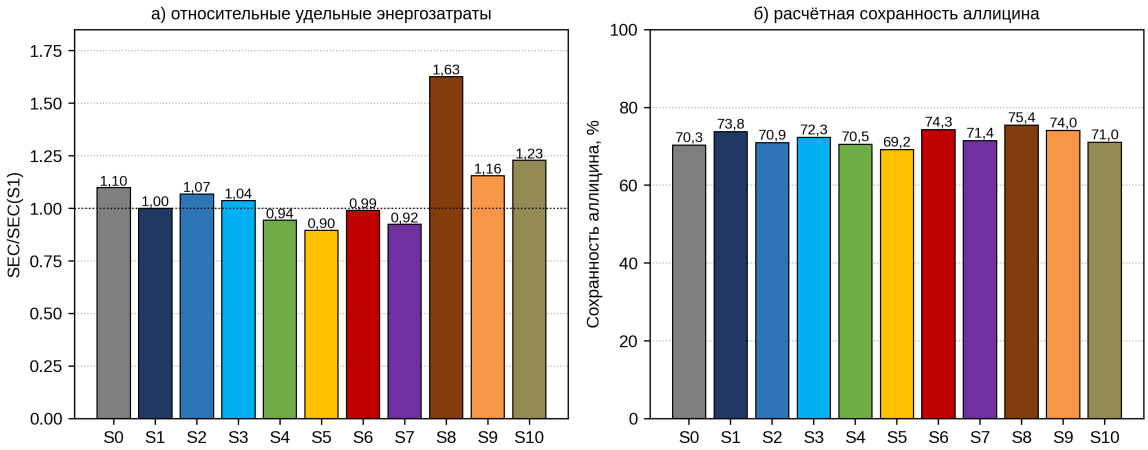


Рисунок 4. Относительные удельные энергозатраты (а) и расчётная сохранность аллицина (б) для вариантов S0–S10

Ступенчатый температурный режим и сохранность аллицина. Ступенчатый режим S6 (70 °C в первые 30 мин, затем 55 °C) обеспечивает сохранность 74,3 % — наибольшую среди режимов с Г = 1 — при энергозатратах 0,99 и продолжительности 135,8 мин, практически равных непрерывному режиму S1. Его выгода объясняется тем, что в первом периоде испарительное охлаждение удерживает температуру ломтика на 12–15 °C ниже температуры агента сушки (рис. 2, б), поэтому повышенная температура агента в этот период ускоряет сушку, не приводя к перегреву продукта, а последующее снижение до 55 °C защищает аллицин на завершающем этапе, когда продукт прогревается до температуры агента.

Чувствительность к структуре энергопотребления. Поскольку выводы о целесообразности прерывания вибрации зависят от доли мощности вибропривода, расчёт повторён для трёх наборов долей (табл. 4). Следовательно, качественные выводы работы устойчивы к неопределённости структуры энергопотребления конкретной установки.

Таблица 4. Относительные удельные энергозатраты SEC/SEC1 при различных долях мощности калорифера, вентилятора и вибропривода

α_h / α_f / α_v	S0	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
0,60 / 0,25 / 0,15	1,04	1,03	1,01	0,94	0,90	1,00	0,93	1,99	1,25	1,27
0,70 / 0,20 / 0,10	1,10	1,07	1,04	0,94	0,90	0,99	0,92	1,63	1,16	1,23
0,80 / 0,15 / 0,05	1,16	1,11	1,06	0,94	0,90	0,99	0,92	1,27	1,07	1,18

Рекомендации по выбору режима. Обобщение результатов позволяет сформулировать правила построения энергосберегающих режимов виброконвективной сушки чеснока: 1) при умеренном виброускорении (Г ≈ 1) вибрация должна быть непрерывной; 2) если для повышения производительности или равномерности используется высокое виброускорение (Г ≈ 3), его следует снижать до Г ≈ 1 после первого периода сушки (ориентировочно 30 мин, до достижения MR ≈ 0,4–0,5), что экономит около 30 % энергии; 3) при приоритете энергозатрат целесообразен импульсный нагрев с P = 20–30 мин и δ = 0,5–0,67 (экономия 6–12 %), при приоритете производительности — непрерывный или ступенчатый по температуре режим;

Заключение

1. Обобщённая модель тепломассопереноса при виброконвективной сушке [1] дополнена расписаниями воздействий, граничными условиями периода отлёжки, относительным показателем энергозатрат с учётом долей мощности калорифера, вентилятора и вибропривода и кинетикой потерь аллицина, что позволяет расчётным путём сопоставлять импульсный режимы по продолжительности, энергозатратам и качеству.

2. Импульсная и ступенчатая вибрация при Г = 1 не снижает энергозатраты (SEC/SEC_1 = 1,04–1,07), так как экономия мощности вибропривода меньше дополнительных затрат калорифера и вентилятора при удлинении сушки; при Г = 3 ступенчатое снижение виброускорения до Г = 1 после первого периода сокращает энергозатраты на 29 % при потере лишь 8 % производительности.

3. Импульсный нагрев с периодами отлёжки является реальным резервом энергосбережения: при P = 20–30 мин и δ = 0,5–0,67 удельные энергозатраты снижаются на 6–12 %, при δ = 0,4 — на 14 %, при увеличении продолжительности цикла на 38–112 %; результат не зависит от структуры энергопотребления установки.

4. Ступенчатый режим 70 → 55 °C обеспечивает наибольшую расчётную сохранность аллицина (74,3 %) при энергозатратах и продолжительности, равных непрерывному режиму; импульсный нагрев по сохранности аллицина преимущества не даёт из-за удлинения цикла.

5. Наиболее перспективными для экспериментальной проверки являются режимы S6 (ступенчатая температура), S9 (ступенчатая вибрация) и S4 (импульсный нагрев 20/10 мин), охватывающие приоритеты качества, производительности и энергозатрат.

Список литературы

1. Миркомилов А.М. Обобщённая математическая модель тепломассопереноса при виброконвективной сушке с учётом усадки и виброускорения // (статья направлена в печать). – 2026.
2. Chua K.J., Mujumdar A.S., Chou S.K. Intermittent drying of bioproducts – an overview // Bioresource Technology. – 2003. – Т. 90, № 3. – P. 285–295.
3. 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. – Т. 435. – Art. 119437.
4. 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. – Т. 11, № 3. – P. 211–220.
5. Kumar C., Karim M.A., Joardder M.U.H. Intermittent drying of food products: a critical review // Journal of Food Engineering. – 2014. – Т. 121. – P. 48–57.
6. Mayor L., Sereno A.M. Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review // Journal of Food Engineering. – 2004. – Т. 61, № 3. – P. 373–386.
7. Mirkomilov A.M., Safarov J.E., Sultanova Sh.A. Improvement of an energy-saving vibro-convective dryer and the garlic drying process based on ANSYS Fluent modeling // American Journal of Biology and Natural Sciences. – 2026. – Т. 6, № 3. – P. 83–87.

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. Rahman M.S., Al-Shamsi Q.H., Bengtsson G.B., Sablani S.S., Al-Alawi A. Drying kinetics and allicin potential in garlic slices during different methods of drying // Drying Technology. – 2009. – T. 27, № 3. – P. 397–404.
10. 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.
11. 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.
12. Zheng Z.-A., Wang S.-Y., Wang H., Xiao H., Liu Z.-L., Pan Y.-H., Gao L. Comparative study on the influence of various drying techniques on drying characteristics and physicochemical quality of garlic slices // Foods. – 2023. – T. 12, № 6. – Art. 1314.

References

1. Mirkomilov A.M. [Generalized mathematical model of heat and mass transfer in vibro-convective drying taking into account shrinkage and vibration acceleration] // (stat'ya napravlena v pechat'). – 2026. (In Russ.).
2. Chua K.J., Mujumdar A.S., Chou S.K. Intermittent drying of bioproducts – an overview // Bioresource Technology. – 2003. – Vol. 90, No. 3. – P. 285–295.
3. 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.
4. 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.
5. Kumar C., Karim M.A., Joardder M.U.H. Intermittent drying of food products: a critical review // Journal of Food Engineering. – 2014. – Vol. 121. – P. 48–57.
6. Mayor L., Sereno A.M. Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review // Journal of Food Engineering. – 2004. – Vol. 61, No. 3. – P. 373–386.
7. Mirkomilov A.M., Safarov J.E., Sultanova Sh.A. Improvement of an energy-saving vibro-convective dryer and the garlic drying process based on ANSYS Fluent modeling // American Journal of Biology and Natural Sciences. – 2026. – Vol. 6, No. 3. – P. 83–87.
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. Rahman M.S., Al-Shamsi Q.H., Bengtsson G.B., Sablani S.S., Al-Alawi A. Drying kinetics and allicin potential in garlic slices during different methods of drying // Drying Technology. – 2009. – Vol. 27, No. 3. – P. 397–404.

10. 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.
11. 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.
12. Zheng Z.-A., Wang S.-Y., Wang H., Xiao H., Liu Z.-L., Pan Y.-H., Gao L. Comparative study on the influence of various drying techniques on drying characteristics and physicochemical quality of garlic slices // Foods. – 2023. – Vol. 12, No. 6. – Art. 1314.

Статья поступила в редакцию: 10.10.2026
Статья принята к публикации: 16.10.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 339.543:664.854

Проблемы классификации сушёной сливы в товарной номенклатуре внешнеэкономической деятельности республики Узбекистан: анализ на основе данных ВЭЖХ о влиянии способа сушки на химический состав

Юсупова Дилобар Абдужалиловна
базовый докторант
Ташкентский химико-технологический институт
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: dilobar324@gmail.com

Хамракулов Махмуд Гафурджанович
PhD
техн. наук, доц., Ташкентский химико-технологический институт
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: mahmud.gafurjanovich@gmail.com

Problems of classifying dried plums in the commodity nomenclature of foreign economic activity of the republic of Uzbekistan: an analysis based on HPLC data on the effect of drying method on chemical composition

Yusupova Dilobar
Basic doctoral student
Tashkent Institute of Chemical Technology
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Khamrakulov Makhmud
PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Tashkent Institute of Chemical Technology
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

Цель исследования – выявить недостатки классификации сушёной сливы в Товарной номенклатуре внешнеэкономической деятельности Республики Узбекистан (ТН ВЭД РУз, редакция 2022 г.) и обосновать предложения по её совершенствованию с учётом различий в химическом составе продукции, полученной разными способами сушки. Методы: сравнительно-аналитический и логико-системный анализ текста номенклатуры с применением Основных правил интерпретации; расчёт идентификационных показателей по данным высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) об углеводном составе сливы солнечной и сублимационной (лиофильной) сушки. Результаты: установлено, что

Библиографическое описание: Юсупова Д.А., Хамракулов М.Г. Проблемы классификации сушёной сливы в товарной номенклатуре внешнеэкономической деятельности республики Узбекистан: анализ на основе данных ВЭЖХ о влиянии способа сушки на химический состав // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23568

продукты, классифицируемые в единой подсубпозиции 0813 20 000 0, различаются по доле сахарозы (39,7 и 3,3 %), отношению фруктоза/глюкоза (0,094 и 0,366) и отношению моно-/дисахаридов (1,52 и 28,4) в 4–19 раз. Выявлены семь недостатков номенклатуры: отсутствие разграничения по способу сушки и определений понятий «сушёный» и «сублимационно высушенный», отсутствие количественных критериев в примечании 3 к группе 08, ограничения рефрактометрического определения сахара, ботаническая неопределённость термина, невыделение замороженной сливы и терминологические несоответствия. Заключение: предложены национальные подсубпозиции 0813 20 000 1/2/9 и 0811 90 950 1/9, дополнительные примечания к группе 08 и идентификационные критерии на основе ВЭЖХ для таможенной экспертизы. Практическая значимость: результаты могут быть использованы при подготовке очередной редакции ТН ВЭД РУз и в работе таможенных лабораторий.

Abstract

The aim of the study is to identify shortcomings in the classification of dried plums in the Commodity Nomenclature of Foreign Economic Activity of the Republic of Uzbekistan (CN FEA RUz, 2022 edition) and to substantiate proposals for its improvement, taking into account differences in the chemical composition of products obtained by different drying methods. Methods: comparative-analytical and logical-systemic analysis of the nomenclature text using the General Rules for Interpretation; calculation of identification indicators from high-performance liquid chromatography (HPLC) data on the carbohydrate composition of sun-dried and freeze-dried plums. Results: products classified under the single subheading 0813 20 000 0 were found to differ 4–19-fold in sucrose share (39.7 and 3.3 %), fructose/glucose ratio (0.094 and 0.366) and mono-/disaccharide ratio (1.52 and 28.4). Seven shortcomings of the nomenclature were identified: no distinction by drying method and no definitions of «dried» and «freeze-dried», no quantitative criteria in Note 3 to Chapter 08, limitations of refractometric sugar determination, botanical ambiguity of the term, no separate subheading for frozen plums, and terminological inconsistencies. Conclusion: national subheadings 0813 20 000 1/2/9 and 0811 90 950 1/9, additional notes to Chapter 08 and HPLC-based identification criteria for customs examination are proposed. Practical significance: the results can be used in preparing the next edition of the CN FEA RUz and in the work of customs laboratories.

Ключевые слова: ТН ВЭД, классификация товаров, сушёная слива, сублимационная сушка, ВЭЖХ, углеводный состав, таможенная экспертиза.

Keywords: commodity nomenclature, goods classification, dried plums, freeze-drying, HPLC, carbohydrate composition, customs examination.

Введение

Сушёные фрукты относятся к традиционным экспортным товарам Узбекистана, и значительное место среди них занимает слива. Правильная классификация товара по Товарной номенклатуре внешнеэкономической деятельности (ТН ВЭД) служит основой для исчисления таможенных платежей, применения мер тарифного и нетарифного регулирования, ведения статистики внешней торговли, а также для сертификации продукции и контроля её безопасности [2; 12].

ТН ВЭД Республики Узбекистан в редакции 2022 г. разработана в соответствии со структурой Гармонизированной системы описания и кодирования товаров. Фрукты в ней классифицируются главным образом по виду и состоянию обработки: свежие – в товарных позициях 0805–0810, замороженные – 0811, консервированные для кратковременного хранения – 0812, сушёные – 0813, а приготовленные или консервированные иными способами – в группе 20 (товарные позиции 2007, 2008) [12]. Однако внутри сушёных фруктов никакого разграничения по технологии сушки не предусмотрено.

Между тем в пищевой технологии наряду с традиционной солнечной сушкой широко применяются конвективная, вакуумная, инфракрасная и сублимационная (лиофильная) сушка [5]. Сублимационно высушенные продукты существенно отличаются от традиционно высушенных по химическому составу, влажности, гигроскопичности, пористой структуре и рыночной цене [3; 6; 7]. В предыдущем исследовании авторов методом ВЭЖХ показано, что при солнечной сушке сливы происходят гидролиз сахарозы и разрушение витамина С, тогда как при лиофильной сушке биологически активные вещества сохраняются значительно лучше [11]. В связи с этим актуален вопрос о том, в какой мере действующая структура номенклатуры отражает такие различия.

Цель работы – на основе данных ВЭЖХ о химическом составе, зависящем от способа сушки, выявить недостатки классификации сушёной сливы в ТН ВЭД РУз и разработать предложения по совершенствованию номенклатуры.

Материалы и методы

Объектами исследования являлись: (1) текст ТН ВЭД РУз в редакции 2022 г. – примечания и дополнительные примечания к группе 08, товарные позиции 0809, 0811, 0812, 0813, 1106, 2008, примечания к группе 20, а также для сравнения товарные позиции 2101 и 8419 [12]; (2) данные об углеводном и витаминном составе образцов сливы солнечной и сублимационной (лиофильной) сушки, полученные методом ВЭЖХ [11].

Текст номенклатуры изучали сравнительно-аналитическим и логико-системным методами на основе Основных правил интерпретации ТН ВЭД (правила 1 и 6); формулировки товарных позиций, субпозиций и примечаний сопоставляли между собой и с международными нормативными документами [1; 10].

Углеводы (фруктоза, глюкоза, сахароза, мальтоза) определяли с рефрактометрическим детектором (RID) в изократическом режиме; подвижная фаза – ацетонитрил: вода (82: 18, по объёму), скорость потока 1,0 мл/мин, температура колонки 35 °C. Витамины определяли с диодно-матричным детектором (DAD) при длине волны 250 нм [11]. Методические подходы соответствовали общепринятым принципам хроматографического анализа пищевых продуктов [4; 8]. На основе полученных количественных данных рассчитывали следующие идентификационные показатели:

– доля сахарозы:

$$S_{д} = S / \Sigma U \cdot 100\ \%; \quad (1)$$

– отношение фруктоза/глюкоза:

$$K_{Ф/Г} = F / G; \quad (2)$$

– отношение моносахаридов к дисахаридам:

$$K_{м/д} = (F + G) / (S + M); \quad (3)$$

– потери общих углеводов:

$$\Delta U = (U_Л – U_С) / U_Л \cdot 100\ \%, \quad (4)$$

где F, G, S, M – содержание соответственно фруктозы, глюкозы, сахарозы и мальтозы, мг/г; ΣU – их сумма, мг/г; $U_Л$ и $U_С$ – общее содержание углеводов в образцах лиофильной и солнечной сушки, мг/г.

Результаты и обсуждение

Система классификации продукции из сливы в ТН ВЭД РУз.

Анализ текста ТН ВЭД РУз 2022 г. показал, что слива и продукты её переработки распределяются по разным группам и товарным позициям в зависимости от степени обработки (табл. 1).

Таблица 1. Классификация продукции из сливы по ТН ВЭД РУз (2022)

Форма продукции	Код ТН ВЭД	Наименование (под)субпозиции	Выделена ли слива отдельно
Слива свежая	0809 40 050 0	– – сливы	да
Слива замороженная, без сахара	0811 90 950 0	– – – прочие	нет
Замороженная, с содержанием сахара более 13 %	0811 90 190 0	– – – – прочие	нет
Консервированная для кратковременного хранения	0812 90 980 0	– – прочие	нет
Слива сушёная (солнечной, конвективной, сублимационной сушки и т. д.)	0813 20 000 0	– чернослив (узб. «олхўри»)	да (способ сушки не различается)
Смеси сушёных фруктов, содержащие чернослив	0813 50 190 0	– – – с черносливом	да
Порошок из сливы (в т. ч. лиофилизированной)	1106 30 900 0	– – прочие	нет
С добавлением сахара, в упаковках более 1 кг	2008 99 450 0	– – – – – сливы и чернослив	да
С добавлением сахара, в упаковках до 1 кг	2008 99 670 2	– – – – – – сливы и чернослив	да
Без добавления сахара, в упаковках (≥ 5 кг / < 5 кг)	2008 99 720 0 2008 99 780 0	– – – – – – 5 кг или более / менее 5 кг	да

Источник: составлено авторами по ТН ВЭД РУз 2022 [12].

Из табл. 1 видно, что слива имеет отдельные коды в свежем виде и в виде продуктов группы 20, тогда как в замороженном и временно консервированном состоянии она «растворяется» в позициях «прочие». Для сушёной сливы предусмотрена шестизначная

субпозиция 0813 20, однако на национальном уровне она не детализирована (0813 20 000 0), и продукты солнечной, воздушной и сублимационной сушки классифицируются одним кодом.

Влияние способа сушки на химический состав и идентификационные показатели.

Содержание углеводов в сливе в зависимости от способа сушки приведено в табл. 2 и на рис. 1.

Таблица 2. Содержание углеводов в сливе в зависимости от способа сушки, мг/г [11]

Углеводы	Сублимационная (лиофильная) сушка	Солнечная сушка
Фруктоза	3,563	13,829
Глюкоза	37,958	37,819
Сахароза	27,347	1,765
Мальтоза	0,056	0,053
Итого	**68,924**	**53,465**

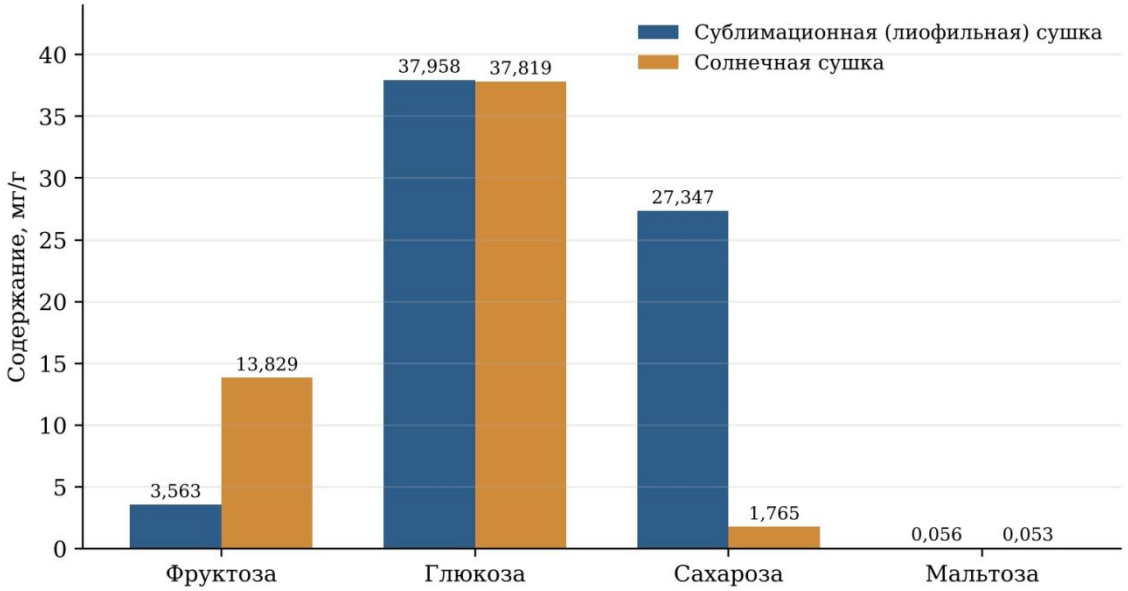


Рисунок 1. Содержание углеводов в сливе в зависимости от способа сушки, мг/г

В образце солнечной сушки содержание сахарозы по сравнению с лиофильным образцом снизилось на 93,5 %, а содержание фруктозы возросло в 3,88 раза; потери общих углеводов составили 22,4 %. Это объясняется гидролизом сахарозы до глюкозы и фруктозы под действием повышенной температуры и длительной сушки [11]. Практически неизменное содержание глюкозы (≈38 мг/г) может быть связано с тем, что часть образующейся при гидролизе глюкозы расходуется в реакциях Майяра и карамелизации; это предположение требует дополнительной проверки. Анализ витаминов также показал хорошую сохранность аскорбиновой кислоты при лиофильной сушке и её частичное разрушение при солнечной сушке [11].

Поскольку абсолютные значения зависят от сорта и степени зрелости сырья, для целей классификации более надёжны относительные показатели. Рассчитанные идентификационные показатели представлены в табл. 3.

Таблица 3. Расчётные идентификационные показатели сушёной сливы

Показатель	Лиофильная сушка	Солнечная сушка	Различие, раз
Доля сахарозы $S_д$, %	39,7	3,3	12,0
Отношение фруктоза/глюкоза $K_{Ф/Г}$	0,094	0,366	3,9
Отношение моно-/дисахаридов $K_{м/д}$	1,52	28,4	18,7
Доля мальтозы, %	0,081	0,099	≈1
Общие углеводы ΣU, мг/г	68,92	53,47	1,29

Результаты показывают, что два продукта, классифицируемые одним кодом ТН ВЭД (0813 20 000 0), различаются по основным идентификационным показателям в 4–19 раз. Доля сахарозы и отношение $K_{м/д}$ чётко отражают характер термического воздействия на продукт и могут служить объективным критерием для лабораторного подтверждения способа сушки. Доля мальтозы при обоих способах практически одинакова (≈0,1 %) и характеризует естественный фоновый уровень; этот показатель важен как база сравнения при выявлении добавления глюкозного сиропа.

Недостатки ТН ВЭД РУз, связанные с классификацией сушёной сливы.

На основе сравнительного анализа текста номенклатуры и полученных результатов выявлены следующие недостатки.

1. Отсутствие разграничения по способу сушки. Подсубпозиция 0813 20 000 0 на национальном уровне не детализирована, вследствие чего резко различающиеся по цене, качеству и составу сублимационно и традиционно высушенная слива учитываются под одним кодом. Это не позволяет отдельно отслеживать в статистике внешней торговли экспорт продукции с высокой добавленной стоимостью, а при контроле таможенной стоимости затрудняет оценку рисков из-за большого разброса цен. Между тем в самой ТН ВЭД РУз существует прецедент такого разграничения: для растворимого кофе сублимированный продукт выделен в отдельные национальные подсубпозиции 2101 11 001 5 и 2101 11 001 6 [12, с. 166].

2. Отсутствие определений понятий «сушёный» и «сублимационно высушенный». В примечаниях к группе 08 не установлены понятие сушёного фрукта, предельная влажность и способы сушки. Термины «сублимационная сушка» и «лиофилизация» используются в номенклатуре лишь применительно к оборудованию (8419 33 000 – аппараты для лиофилизации, сублимационной сушки и распылительной сушки) и кофе (2101 11), но не к фруктам. В международной практике, например в стандарте ЕЭК ООН на чернослив, установлено, что влажность чернослива не должна превышать 35,0 %, а продукт влажностью 24–29 % может маркироваться как «полусухой», 29–35 % – как «готовый к употреблению» [10].

3. Отсутствие количественных критериев в примечании 3 к группе 08. Согласно примечанию, сушёные фрукты могут быть частично регидратированы, подвергнуты «умеренной тепловой обработке», к ним может быть добавлено «небольшое количество глюкозного сиропа», однако «небольшое количество» и пределы регидратации количественно

не выражены [12, с. 88]. В результате граница между кодом 0813 20 000 0 и кодами 2008 99 450 0, 2008 99 670 2, 2008 99 720 0 и 2008 99 780 0 оценивается субъективно, что создаёт риск неодинаковой классификации одного и того же товара на разных таможенных постах.

4. Ограничения рефрактометрического определения сахара. Согласно дополнительному примечанию 1 к группе 08 содержание сахара определяется умножением показания рефрактометра при 20 °C на коэффициент 0,95 [12, с. 88]. Рефрактометр измеряет общее содержание растворимых сухих веществ и учитывает как сахар также сорбит, содержащийся в сливе в значительном количестве [9; 11], и органические кислоты; кроме того, он не отражает, гидролизована ли сахароза. Это может приводить к ошибкам при классификации продукции из сливы в подсубпозициях 0811 90 (порог 13 %) и 2008 99 (пороги 9 и 13 %), где критерием служит содержание сахара.

5. Ботаническая неопределённость. Термин подсубпозиции 0813 20 не конкретизирован ботаническим видом. В русскоязычной и англоязычной версиях Гармонизированной системы ей соответствуют термины «чернослив» / prunes, т. е. сушёные плоды *Prunus domestica* L. [10], тогда как узбекский термин «олхўри» обозначает сливу в целом. В республике широко сушится также алыча (*Prunus cerasifera* Ehrh.), и в номенклатуре прямо не указано, относится ли такой продукт к 0813 20 000 0 или к 0813 40 950 0 («прочие»). Кроме того, для свежих фруктов используется формулировка «сливы и тёрн» (0809 40), для сушёных – «олхўри» (0813 20), а в группе 20 – «сливы и чернослив» (2008 99).

6. Невыделение замороженной сливы. В отличие от свежей и сушёной сливы замороженная слива остаётся в составе подсубпозиции 0811 90 950 0 («прочие»). В результате невозможно последовательно проследить статистику по цепочке добавленной стоимости «свежая – замороженная – сушёная – переработанная». Поскольку сублимационная сушка требует предварительного замораживания, это звено важно и в технологическом отношении.

7. Терминологические несоответствия. В тексте групп 08 и 20 выявлено разное написание одних и тех же ботанических названий и терминов (табл. 4). Такие несоответствия приводят к ошибкам в системах электронного декларирования и автоматизированного поиска.

Таблица 4. Терминологические несоответствия в группах 08 и 20 ТН ВЭД РУз 2022

Термин	Варианты в тексте (код ТН ВЭД или примечание)	Рекомендуемая единая форма
Prunus cerasus	«Прунус серасус» (0809 21 000 0); «Prunus cerasus» (0811 90 750 0); «Prunus serasus» (2008 60 500 1)	Prunus cerasus (латиницей)
Папайя	«папая» (0807 20 000 0, 0813 40 500 0); «папайя» (0813 50 120 0); «папайа» (доп. примечание 2 к гр. 08)	единая форма, напр. «папая»
Гуава	«гуава» (0804 50 000, 0812 90 700 0); «гуайява» (доп. примечание 2 к гр. 08)	«гуава»
Мангостан	«мангостин» (0804 50 000, 0812 90 700 0); «манго-стан» (доп. примечание 2 к гр. 08)	«мангостан»
Гарциния	«гарсиния» (0804 50 000); «гарциния» (доп. примеча-ние 2 к гр. 08)	единая форма

Термин	Варианты в тексте (код ТН ВЭД или примечание)	Рекомендуемая единая форма
Глава / группа	«ушбу бобнинг» (0813, 0813 50) – в остальном тексте «гуруҳ»	«гуруҳ» (группа)
Наименование группы	«ЦИТРУС МЕВАЛАРИ» – латинские буквы «А» в кириллическом тексте	кириллицей

Источник: составлено авторами по ТН ВЭД РУз 2022 [12] (цитаты приведены на языке оригинала).

Предложения по совершенствованию ТН ВЭД РУз.

Для устранения выявленных недостатков разработаны следующие предложения.

Предложение 1. Введение национальных подсубпозиций. Не затрагивая шестизначную структуру Гармонизированной системы, предлагается за счёт десятого знака на национальном уровне выделить сушёную и замороженную сливу (табл. 5). В дальнейшем этот подход может быть распространён на субпозиции 0813 10 (абрикосы), 0813 30 (яблоки) и 0813 40 (прочие фрукты).

Таблица 5. Предлагаемые национальные подсубпозиции ТН ВЭД РУз

Действующий код и наименование	Предлагаемый код	Предлагаемое наименование
0813 20 000 0 – чернослив	0813 20 000 1	– – сублимационной (лиофильной) сушки
	0813 20 000 2	– – прочий, без косточек
	0813 20 000 9	– – прочий
0811 90 950 0 – – – прочие	0811 90 950 1	– – – – сливы (Prunus domestica L.)
	0811 90 950 9	– – – – прочие

Предложение 2. Введение дополнительных примечаний к группе 08 в следующей редакции

«6. В подсубпозиции 0813 20 000 1 под «сублимационной (лиофильной) сушкой» понимаются продукты, полученные из предварительно замороженных фруктов удалением влаги путём перехода льда непосредственно в пар (сублимации) при пониженном давлении (вакууме) и сохранившие пористую структуру.»

«7. В подсубпозициях 0811 90 950 1 и 0813 20 под «сливой» и «черносливом» понимаются плоды вида Prunus domestica L.; сушёные плоды Prunus cerasifera Ehrh. (алыча) и других видов рода Prunus включаются в подсубпозицию 0813 40 950 0.»

Перед принятием окончательного решения по примечанию 7 необходимо проверить его соответствие классификационным решениям Всемирной таможенной организации и Пояснениям к Гармонизированной системе.

Предложение 3. Внедрение идентификационных критериев для таможенной экспертизы. Для снижения субъективности при применении примечания 3 к группе 08 предлагается использовать показатели, определяемые методом ВЭЖХ (табл. 6).

Таблица 6. Предлагаемые идентификационные критерии для классификации сушёной сливы

Показатель	Метод определения	Назначение при классификации
Доля сахарозы $S_д$; отношение $K_{м/д}$	ВЭЖХ-RID	Разграничение подсубпозиций 0813 20 000 1 и 0813 20 000 9 (подтверждение способа сушки)
Отношение фруктоза/глюкоза $K_{Ф/Г}$	ВЭЖХ-RID	Оценка степени термического воздействия
Доля мальтозы и мальтоолигосахаридов	ВЭЖХ-RID	Выявление добавления глюкозного сиропа (граница 0813 и 2008, п. «б» примечания 3)
Влажность, %	Гравиметрический	Подтверждение состояния «сушёный» (≤ 35 % [11]), установление предела частичной регидратации
Сумма моно- и дисахаридов	ВЭЖХ-RID	Дополнение рефрактометрического метода при определении порогов содержания сахара в 0811 90 и 2008 99

Пороговые значения критериев должны быть статистически обоснованы на репрезентативной выборке образцов разных сортов, регионов выращивания и сезонов; полученные в данной работе значения (табл. 3) являются исходной базой для такого исследования.

Предложение 4. Уточнение дополнительного примечания 1 к группе 08. Для фруктов, содержащих полиолы (сорбит), предлагается определять содержание сахара методом ВЭЖХ как сумму моно- и дисахаридов, а рефрактометрический метод сохранить в качестве предварительного (скринингового).

Предложение 5. Унификация терминологии. Несоответствия, приведённые в табл. 4, следует устранить в очередной редакции ТН ВЭД РУз, а ботанические названия приводить в единой форме латиницей.

Предложение 6. Увязка кодов ТН ВЭД с нормативными документами. Для использования при сертификации и оценке соответствия целесообразно разработать таблицу соответствия кодов ТН ВЭД и стандартов, устанавливающих требования к продукции (например, для 0813 20 000 0 – ГОСТ 32896-2014 [1] и стандарт ЕЭК ООН на чернослив [10]).

Заключение

1. В ТН ВЭД РУз 2022 г. сушёная слива независимо от способа сушки классифицируется единым кодом 0813 20 000 0, тогда как анализ ВЭЖХ показал, что слива сублимационной и солнечной сушки различается по доле сахарозы (39,7 и 3,3 %), отношению фруктоза/глюкоза (0,094 и 0,366) и отношению моно-/дисахаридов (1,52 и 28,4) в 4–19 раз.

2. Выявлены семь недостатков номенклатуры, связанных с классификацией сушёной сливы: отсутствие разграничения по способу сушки; отсутствие определений понятий «сушёный» и «сублимационно высушенный»; отсутствие количественных критериев в примечании 3 к группе 08; ограничения рефрактометрического определения сахара; ботаническая неопределённость; невыделение замороженной сливы; терминологические несоответствия.

3. Без изменения структуры Гармонизированной системы предложено ввести национальные подсубпозиции 0813 20 000 1/2/9 и 0811 90 950 1/9, два дополнительных примечания к группе 08, а также применять в таможенной экспертизе идентификационные критерии на основе ВЭЖХ. Прецедентом служат имеющиеся в ТН ВЭД РУз национальные подсубпозиции для сублимированного кофе (2101 11 001 5/6).

4. Предложенные изменения позволят вести статистический учёт экспорта сушёной фруктовой продукции с высокой добавленной стоимостью, снизить субъективность классификации и увязать классификацию, сертификацию и контроль безопасности продукции.

Список литературы

1. ГОСТ 32896-2014. Фрукты сушёные. Общие технические условия. – Москва: Стандартинформ, 2015. – 16 с.
2. Международная конвенция о Гармонизированной системе описания и кодирования товаров (Брюссель, 14 июня). – Брюссель. – 1983. – 22 с.
3. Цюжиньская А., Ленарт А. Ciurzyńska A., Lenart A. Freeze-drying – application in food processing and biotechnology – a review // Polish Journal of Food and Nutrition Sciences. – 2011. – Т. 61, № 3. – P. 165–171.
4. AOAC. Official Methods of Analysis / AOAC International. – 18th ed. – Gaithersburg: AOAC International, 2005. – 2500 P.
5. Fellows, P.J. Food Processing Technology: Principles and Practice / P.J. Fellows. – 4th ed. – Duxford: Woodhead Publishing, 2017. – 984 P.
6. Krokida M.K., Maroulis Z.B. Effect of drying method on shrinkage and porosity // Drying Technology. – 1997. – Т. 15, № 10. – P. 2441–2458.
7. Ratti C. Hot air and freeze-drying of high-value foods: a review // Journal of Food Engineering. – 2001. – Т. 49, № 4. – P. 311–319.
8. Snyder L.R., Kirkl, J.J., Dolan J.W. Introduction to Modern Liquid Chromatography. – 3rd ed. – Hoboken: Wiley, 2010. – 912 P.
9. Stacewicz-Sapuntzakis M., Bowen P.E., Hussain E.A., Damayanti-Wood B.I., Farnsworth N.R. Chemical composition and potential health effects of prunes: a functional food? // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. – 2001. – Т. 41, № 4. – P. 251–286.
10. UNECE. Alignment and revision of UNECE standards: Prunes. ECE/CTCS/WP.7/GE.2/2017/9. – Geneva: United Nations Economic Commission for Europe, 2017.
11. Yusupova D.A., Xamroqulov M.G., Yusupova D.A. Quritish usullarining olxori tarkibidagi uglevod va vitaminlarga ta’sirini HPLC usulida tahlil qilish // Development of science. – 2026. – Т. 6, № 4.
12. Ўзбекистон Республикаси ташқи иқтисодий фаолиятининг товар номенклатураси (2022 йил таҳрири). – Тошкент: Инвестициялар, саноат ва савдо вазирлиги; Божхона қўмитаси, 2022. – 785 с.

References

1. GOST 32896-2014. [Dried fruits. General specifications]. – M.: Standartinform, 2015 (In Russ.).
2. [International Convention on the Harmonized Commodity Description and Coding System (Brussels, 14 June)]. – Bryussel', 1983 (In Russ.).
3. Цюжиньская А., Ленарт А. [Ciurzyńska A., Lenart A. Freeze-drying – application in food processing and biotechnology – a review] // Polish Journal of Food and Nutrition Sciences. – 2011. – Vol. 61, No. 3. – P. 165–171. (In Russ.).
4. AOAC. Official Methods of Analysis. – 18th ed. – Gaithersburg: AOAC International, 2005.
5. Fellows P.J. Food Processing Technology: Principles and Practice. – 4th ed. – Duxford: Woodhead Publishing, 2017.
6. Krokida M.K., Maroulis Z.B. Effect of drying method on shrinkage and porosity // Drying Technology. – 1997. – Vol. 15, No. 10. – P. 2441–2458.
7. Ratti C. Hot air and freeze-drying of high-value foods: a review // Journal of Food Engineering. – 2001. – Vol. 49, No. 4. – P. 311–319.
8. Snyder L.R., Kirkl J.J., Dolan J.W. Introduction to Modern Liquid Chromatography. – 3rd ed. – Hoboken: Wiley, 2010. – 912 P.
9. Stacewicz-Sapuntzakis M., Bowen P.E., Hussain E.A., Damayanti-Wood B.I., Farnsworth N.R. Chemical composition and potential health effects of prunes: a functional food? // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. – 2001. – Vol. 41, No. 4. – P. 251–286.
10. UNECE. Alignment and revision of UNECE standards: Prunes. ECE/CTCS/WP.7/GE.2/2017/9. – Geneva: United Nations Economic Commission for Europe, 2017.
11. Yusupova D.A., Xamroqulov M.G., Yusupova D.A. Quritish usullarining olxori tarkibidagi uglevod va vitaminlarga ta’sirini HPLC usulida tahlil qilish // Development of science. – 2026. – Vol. 6, No. 4.
12. Ўзбекистон Республикаси ташқи иқтисодий фаолиятининг товар номенклатураси (2022 йил таҳрири). – Тошкент: Инвестициялар, саноат ва савдо вазирлиги; Божхона қўмитаси, 2022. – 785 с.

ИНФРАСТРУКТУРА И ТРАНСПОРТ

СТРОИТЕЛЬСТВО, АРХИТЕКТУРА И ЖИЛИЩНО-КОММУНАЛЬНОЕ ХОЗЯЙСТВО

Статья поступила в редакцию: 27.09.2026
Статья принята к публикации: 12.10.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 691.542.

Методы исследования и испытания сухих напольных покрытий на цементной основе

Айтмуратов Аманбай Туўелбай улы
преподаватель
Каракалпакский государственный университет имени Бердаха
Республика Узбекистан, г. Нукус
E-mail: aytmuratovamanbay26@gmail.com

Асаматдинов Марат Оринбоевич
д-р философии (PhD), доц.
Каракалпакский государственный университет имени Бердаха
Республика Узбекистан, г. Нукус
E-mail: maratasamatdinov@gmail.com

Research and test methods for cement-based dry floor coverings

Aytmuratov Amanbay Tuwelbay ulı
teacher
Berdakh Karakalpak State University
Uzbekistan, Nukus

Asamatdinov Marat Orinbaevich
doctor of Philosophy (PhD)
Berdakh Karakalpak State University
Uzbekistan, Nukuscity

Аннотация

Сухие строительные смеси для устройства напольных покрытий на цементной основе широко применяются при строительстве и реконструкции зданий различного назначения благодаря высоким эксплуатационным характеристикам, технологичности и пригодности к механизированному нанесению. Современные требования к качеству полов предусматривают

Библиографическое описание: Айтмуратов А.Т. улы, Асаматдинов М.О. Методы исследования и испытания сухих напольных покрытий на цементной основе // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23546

высокую прочность, износостойкость, адгезию к основанию, трещиностойкость, стабильность размеров и долговечность в условиях эксплуатации. Для оценки соответствия материалов нормативным требованиям применяется комплексный подход, включающий определение физико-механических, технологических, эксплуатационных и микроструктурных характеристик. В статье рассматриваются современные методы испытаний сухих цементных напольных смесей в соответствии с требованиями ГОСТ, европейских стандартов EN и международных методик ASTM. Приведены методы определения подвижности растворных смесей, прочности при сжатии и изгибе, адгезии к основанию, водопоглощения, истираемости, усадочных деформаций, морозостойкости и долговечности. Особое внимание уделено современным инструментальным методам исследования структуры затвердевшего цементного камня, включая рентгенофазовый анализ, электронную микроскопию, термический анализ и определение пористой структуры материалов. Также представлен анализ преимуществ и ограничений каждого метода испытаний при разработке новых рецептур сухих строительных смесей. Выполнена систематизация действующих стандартов и приведено сопоставление методов испытаний по ГОСТ, EN и ASTM с использованием табличных форм.

Abstract

Cement-based dry building mixes for flooring installations are widely used in the construction and reconstruction of various types of buildings due to their high performance characteristics, workability, and suitability for mechanized application. Modern floor quality requirements stipulate high strength, wear resistance, adhesion to the substrate, crack resistance, dimensional stability, and durability in service. To assess the compliance of materials with regulatory requirements, comprehensive testing methods are employed, involving the determination of their physico-mechanical, application, performance, and microstructural characteristics. The article examines modern methods for testing dry cement-based flooring mixtures in accordance with GOST requirements, European EN standards, and international ASTM methodologies. Methods for determining the flowability of mortar mixtures, compressive and flexural strength, adhesion to the substrate, water absorption, abrasion resistance, shrinkage deformation, frost resistance, and durability are presented. Particular attention is paid to modern instrumental methods for studying the structure of hardened cement paste, including X-ray phase analysis, electron microscopy, thermal analysis, and the determination of the porous structure of materials. An analysis of the advantages and limitations of each test method during the development of new dry building mix formulations is also provided.

Ключевые слова: сухие строительные смеси, цементные напольные покрытия, методы испытаний, прочность при сжатии, прочность при изгибе, адгезия, водопоглощение, истираемость, микроструктура, долговечность.

Keywords: dry building mixes, cement floor coverings, test methods, compressive strength, flexural strength, adhesion, water absorption, abrasion resistance, microstructure, durability.

Введение

Сухие строительные смеси на цементной основе являются одним из наиболее востребованных материалов современного строительства. Они применяются при устройстве стяжек, самовыравнивающихся полов, ремонтных составов и высокопрочных промышленных покрытий. Благодаря высокой заводской готовности обеспечиваются стабильность состава, снижение трудоемкости работ и повышение качества готовых покрытий [23; с. 54–62].

Современные цементные напольные покрытия должны обладать комплексом эксплуатационных характеристик, обеспечивающих длительный срок службы в условиях механических нагрузок, воздействия влаги, перепадов температур и химически агрессивных сред. Наиболее значимыми показателями являются прочность при сжатии и изгибе, адгезионная прочность, стойкость к истиранию, трещиностойкость, водонепроницаемость и стабильность линейных размеров [26; с. 17–28].

Разработка новых составов сухих смесей невозможна без применения современных методов исследования. Комплекс испытаний позволяет установить взаимосвязь между составом материала, особенностями формирования микроструктуры цементного камня и эксплуатационными свойствами покрытия. Помимо традиционных механических испытаний все большее распространение получают инструментальные методы анализа, позволяющие изучать фазовый состав продуктов гидратации, морфологию новообразований и распределение пор различных размеров [28; с. 21–27; 25; с. 68–72].

Целью является систематизация современных методов исследования и испытаний сухих напольных покрытий на цементной основе, анализ их информативности и области применения при разработке новых строительных материалов.

Современные требования к сухим напольным покрытиям на цементной основе

Сухие напольные смеси представляют собой многокомпонентные композиционные материалы, включающие портландцемент или композиционные цементы, минеральные заполнители различной крупности, тонкодисперсные минеральные наполнители, редиспергируемые полимерные порошки, эфиры целлюлозы, пластифицирующие, стабилизирующие и другие функциональные добавки.

В зависимости от назначения различают смеси для устройства традиционных стяжек, самонивелирующихся полов, быстротвердеющих покрытий, высокопрочных промышленных полов, ремонтных составов и специальных полов с повышенной химической стойкостью [1; с. 8–9; 2; с. 9].

Для каждого типа материала нормативными документами устанавливаются требования к прочности, удобоукладываемости, времени схватывания, адгезии, усадке и долговечности.

Особое значение имеет прочность при сжатии, которая определяет способность покрытия воспринимать эксплуатационные нагрузки. Для жилых и общественных зданий широко применяются материалы классов прочности по СТБ EN 206 С20–С30, тогда как для промышленных полов используются смеси классов С40–С60 и выше. Не менее важной характеристикой является прочность при изгибе, оказывающая существенное влияние на трещиностойкость и сопротивление динамическим нагрузкам.

Материалы и методы

1. Системы стандартизации, регламентирующие методы испытаний сухих напольных покрытий

Оценка качества сухих напольных покрытий на цементной основе осуществляется в рамках нескольких систем стандартизации, каждая из которых имеет свои особенности построения и область применения.

ГОСТ (межгосударственная система стандартизации). Основополагающими документами являются ГОСТ 31357–2007 «Смеси сухие строительные на цементном вяжущем. Общие технические условия» [5] и ГОСТ 31358–2019 «Смеси сухие строительные напольные на цементном вяжущем. Методы испытаний» [6]. Методы испытаний строительных растворов общего назначения регламентируются ГОСТ 5802–86 [7]. Определение прочности сцепления с основанием проводится по ГОСТ 31356–2007 «Смеси сухие строительные на цементном вяжущем. Методы испытаний» [8]. Система ГОСТ характеризуется детальной регламентацией процедур подготовки образцов и условий твердения.

EN (европейская система стандартизации). Базовым стандартом на напольные материалы является EN 13813:2002 «Screed material and floor screeds — Screed material — Properties and requirements», устанавливающий перечень характеристик и классов для материалов стяжек [14]. Методы испытаний регламентируются серией стандартов EN 13892 «Methods of test for screed materials», включающей определение прочности при сжатии и изгибе (EN 13892-2) [15], истираемости по Бёме (EN 13892-3) [16], поверхностной твердости (EN 13892-6) [17], адгезионной прочности (EN 13892-8) [18], а также стабильности размеров (EN 13892-9) [19]. Стандарты EN основаны на принципах консенсуса, открытости и обязательного принятия в качестве национальных стандартов стран-членов CEN.

ASTM (американская система стандартизации). Применительно к сухим напольным смесям на цементной основе действует ASTM C1708/C1708M «Standard Test Methods for Self-leveling Mortars Containing Hydraulic Cements» [9]. Определение прочности при сжатии проводится по ASTM C109/C109M (образцы-кубы 50 мм) [10], прочности при изгибе — по ASTM C348 (образцы-балочки) [11]. Водопоглощение определяется по ASTM C1585 [12], истираемость — по ASTM C779/C779M [13].

ISO (международная система стандартизации). Ряд стандартов ISO, в частности ISO 679 «Cement — Test methods — Determination of strength», частично гармонизирован с EN 196 – 1. В области испытаний строительных растворов ISO 679 устанавливает метод определения прочности цемента на образцах-балочках 40×40×160 мм [24].

2. Перечень свойств, подлежащих оценке, и соответствующие методы испытаний

На основе анализа стандартов общих технических условий на смеси (ГОСТ 31357, EN 13813, ASTM C1708) сформирован перечень основных показателей, подлежащих оценке, и установлены соответствующие методы испытаний по трем системам стандартизации.

Таблица 1. Перечень оцениваемых свойств и соответствующие методы испытаний по ГОСТ, EN и ASTM

№	Оцениваемое свойство	ГОСТ	EN	ASTM
1	Подвижность (растекаемость) растворной смеси	ГОСТ 5802–86	EN 13892-1	ASTM C1437
2	Прочность при сжатии	ГОСТ 31358–2019, ГОСТ 5802–86	EN 13892-2	ASTM C109/ C109M
3	Прочность при изгибе	ГОСТ 31358–2019, ГОСТ 5802–86	EN 13892-2	ASTM C348
4	Адгезионная прочность (сцепление с основанием)	ГОСТ 31356–2007	EN 13892-8	ASTM C1583
5	Капиллярное водопоглощение	ГОСТ 12730.3–2020	EN 1015-18	ASTM C1585
6	Истираемость	ГОСТ 13087–81	EN 13892-3 (Böhme), EN 13892-4 (BCA)	ASTM C779/ C779M
7	Усадочные деформации / стабильность размеров	ГОСТ 24544–81	EN 13892-9	ASTM C157
8	Морозостойкость контактной зоны	ГОСТ 31356–2007 (разд. 8)	EN 13892-1	ASTM C666/ C666M
9	Поверхностная твердость	—	EN 13892-6	ASTM C805
10	Модуль упругости при сжатии	ГОСТ 24452–80	EN 13892-2	ASTM C469/ C469M

3. Критерии сопоставления методов испытаний

Для систематизированного сопоставления методов испытаний по различным системам стандартизации приняты следующие критерии:

1. Применяемое оборудование — тип и характеристики испытательных установок (прессы, смесители, приборы для отрыва, истирающие круги и др.).

2. Точность и достоверность результатов — воспроизводимость, повторяемость, статистическая обработка.

3. Стоимость оборудования и трудоемкость испытаний — доступность оборудования, продолжительность подготовки и проведения испытаний.

4. Сопоставимость результатов — возможность прямого сравнения данных, полученных по разным системам стандартов.

5. Специфичность для напольных покрытий — учет особенностей самонивелирующихся смесей и тонкослойных покрытий.

6. Адгезионная прочность к бетонному основанию определяет надежность совместной работы покрытия с основанием. Недостаточная адгезия приводит к образованию пустот, отслаиванию и преждевременному разрушению пола. Для повышения сцепления широко применяются полимерные модификаторы, микрокремнезем, тонкомолотые минеральные добавки и специальные грунтовочные составы. По ГОСТ 31356-2007 «Сухие смеси строительные на цементном вяжущем. Методы испытании» для испытания приготовили образец бетонной плиты с размерами не менее 300х150х40 мм с шероховатой поверхностью

А3 по ГОСТ 13015-2012. Отрыв от основания проводили специальным прибором для определения прочности на адгезию ПСО – МГ4, которое показано на рисунке 1 [3; с. 6; 4; с. 9].

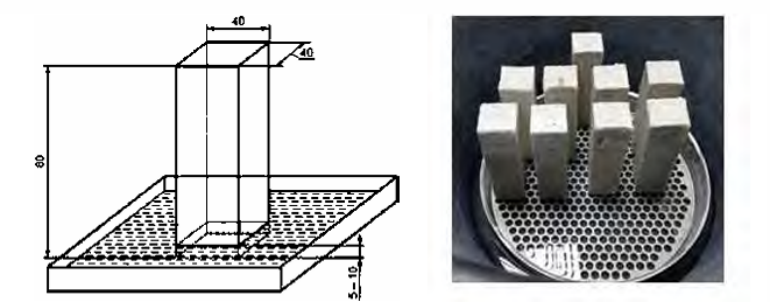


Рисунок 1. Испытательные плиты и прибор ПСО–МГ4 для определения прочности на адгезию

Результаты и обсуждение

Определение подвижности и растекаемости растворной смеси. Подвижность растворной смеси характеризует ее способность равномерно распределяться по поверхности основания без расслоения и образования пустот. Для традиционных стяжек определяют подвижность по расплыву или осадке стандартного конуса, а для самонивелирующихся составов основным показателем является диаметр растекания смеси.

Испытания проводят при температуре (20 ± 2) °C и относительной влажности воздуха не менее 50 %. После приготовления смеси в соответствии с рекомендациями производителя определяют диаметр растекания в двух взаимно перпендикулярных направлениях, после чего вычисляют среднее значение. Для самовыравнивающихся смесей оптимальная величина расплыва обычно составляет 220–300 мм, что обеспечивает хорошую текучесть без расслоения материала.

Таблица 2. Сопоставление методов определения подвижности растворной смеси

Параметр	ГОСТ 5802–86	EN 13892-1	ASTM C1437
Оборудование	Конус стандартный, вискозиметр	Конус растекания, стол встряхивания	Flow table, конус
Условия проведения	(20±2)°C, влажность ≥50%	(20±5)°C	(23±2)°C, влажность ≥50%
Измеряемая величина	Осадка конуса, мм	Диаметр расплыва, мм	Расплыв после 25 ударов, %
Точность	±1 мм	±1 мм	±1%
Применимость к самонивелирующимся смесям	Ограниченная	Основной метод	Ограниченная

Определение прочности при сжатии. Прочность при сжатии является одним из важнейших показателей качества цементных напольных покрытий. После испытания образцов на изгиб обе половинки балочек подвергают сжатию на гидравлическом прессе.

Испытания проводят, как правило, через 1, 3, 7 и 28 суток, что позволяет оценить кинетику набора прочности. Современные самовыравнивающиеся смеси способны достигать прочности 20–30 МПа уже через сутки твердения, а через 28 суток значения могут превышать 50–60 МПа.

Рост прочности обусловлен процессами гидратации цемента, образованием гидросиликатов кальция (C–S–H), снижением пористости и формированием плотной структуры цементного камня [30; 29].

Определение прочности сцепления с основанием. Адгезионная прочность является одним из основных эксплуатационных показателей напольных покрытий. Испытания выполняют методом отрыва металлического штампа, приклеенного к поверхности покрытия высокопрочным эпоксидным клеем.

По ГОСТ 31356–2007 для испытания изготавливают образец бетонной плиты с размерами не менее 300×150×40 мм с шероховатой поверхностью А3 по ГОСТ 13015–2012. Отрыв от основания проводят специальным прибором для определения прочности на адгезию ПСО–МГ4 (рисунок 1). Скорость нагружения при испытании должна быть (250 ± 50) Н/с [8].

Определение капиллярного водопоглощения. Капиллярное водопоглощение характеризует способность материала поглощать воду за счет капиллярных сил. Этот показатель особенно важен при эксплуатации полов в помещениях с повышенной влажностью, а также при периодическом увлажнении покрытия.

Образцы-балочки размером 40×40×160 мм изготавливались из растворной смеси с подвижностью Пк3 и хранились при температуре (20 ± 2) °С.

Капиллярное водопоглощение Wk определяли по формуле:

$$W_k = K(m_1 - m_2); \quad (1)$$

Испытание заключается в контакте нижней поверхности образца с водой при строго контролируемой глубине погружения. Через заданные интервалы времени фиксируют прирост массы, после чего рассчитывают коэффициент капиллярного водопоглощения.

Снижение данного показателя свидетельствует об уменьшении количества открытых капилляров и формировании более плотной структуры цементного камня. Наиболее эффективно уменьшению капиллярного подсоса способствуют кремнийорганические гидрофобизаторы, латексные добавки и активные минеральные компоненты [21].

Таблица 3. Сопоставление методов определения капиллярного водопоглощения

Параметр	ГОСТ 12730.3–2020	EN 1015-18	ASTM C1585
Форма и размер образца	Балочка 40×40×160 мм	Образец 40×40×160 мм	Цилиндр Ø100 мм, h=50 мм
Условия кондиционирования	Высушивание до постоянной массы	(20±2)°C, влажность 65±5%	(23±2)°C, влажность 50±5%
Продолжительность	До насыщения	До 24 ч	До 8 суток
Измеряемая величина	Коэффициент водопоглощения	Коэффициент капиллярного водопоглощения	Скорость поглощения (сорбтивность)
Точность	±0,1%	±0,01 кг/(м²·мин$^{0.5}$)	±0,001 мм/с$^{0.5}$

Рентгенофазовый анализ (XRD). Рентгенофазовый анализ является одним из наиболее распространенных методов исследования цементных композитов. Метод основан на дифракции рентгеновского излучения кристаллическими фазами материала. С помощью XRD определяют содержание портландита, эттрингита, кварца, кальцита, непрореагировавших минералов клинкера и других продуктов гидратации цемента. Изменение интенсивности дифракционных максимумов позволяет оценить степень гидратации цемента и влияние активных минеральных добавок на формирование структуры цементного камня [27].

Для исследования фазового состава штукатурных смесей применяли рентгенофазовый анализ. Съемку рентгенограмм производили на аппарате ДРОН-3 (рис. 2). Параметры съемки: начальный угол – 5,00°; конечный угол – 70,00°; шаг – 0,01°.

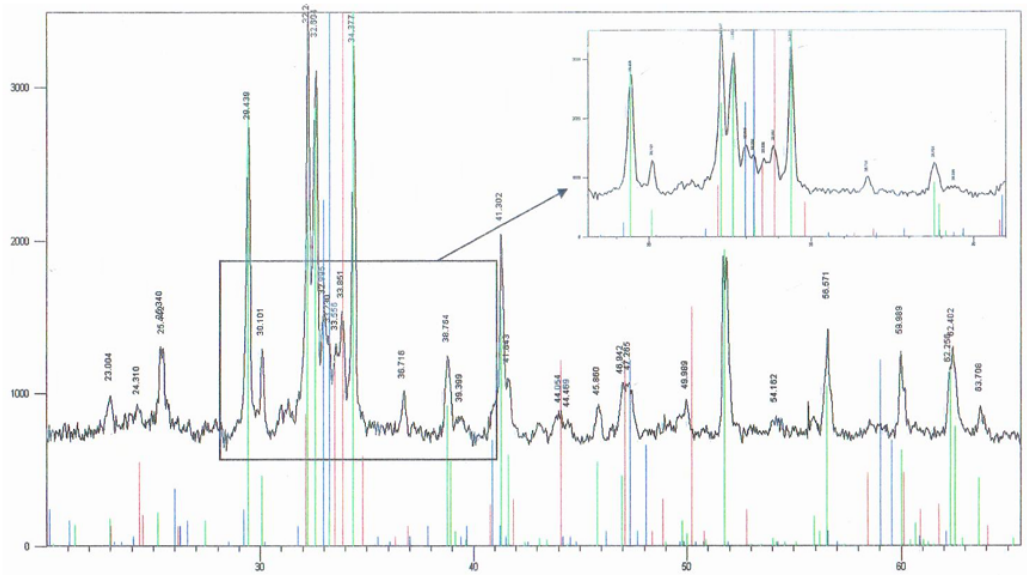


Рисунок 2. Дифрактограмма портландцемента

По данным РФА также определяли размер кристаллитов минералов. Размер кристаллитов может быть оценен по величине физического уширения пика, соответствующего данному соединению на дифрактограмме. Особенно информативен данный метод при исследовании составов, содержащих микрокремнезем, метакаолин, доменный гранулированный шлак и золу-уноса.

Сканирующая электронная микроскопия (SEM). Сканирующая электронная микроскопия позволяет исследовать микроструктуру материала с увеличением до нескольких десятков тысяч раз.

Метод применяется для изучения: морфологии гидросиликатов кальция (C-S-H), кристаллов портландита, эттрингита, контактной зоны между заполнителем и цементным камнем, микротрещин и распределения пор [20].

Полученные изображения позволяют установить взаимосвязь между структурой материала и его прочностными характеристиками. SEM особенно широко используется при разработке новых модифицированных сухих строительных смесей (рис. 3).

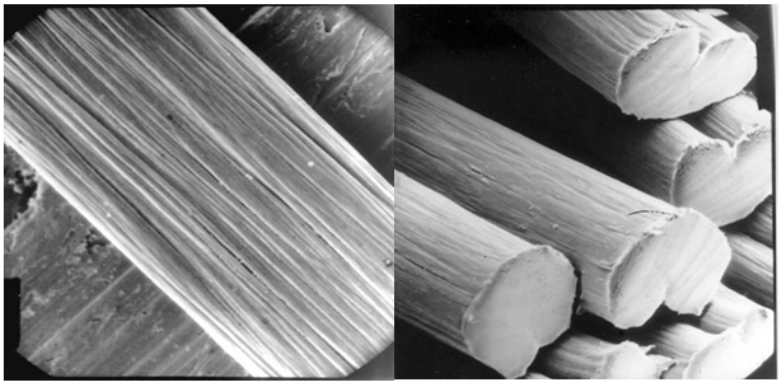


Рисунок 3. Поперечное сечение волокна и его поверхность под электронным микроскопом

Термический анализ (DTA/TG). Дифференциальный термический анализ и термогравиметрия применяются для исследования процессов дегидратации продуктов гидратации цемента.

Метод позволяет определить: количество химически связанной воды, содержание гидроксида кальция, степень гидратации цемента, карбонизацию цементного камня и влияние минеральных добавок на процессы твердения [22].

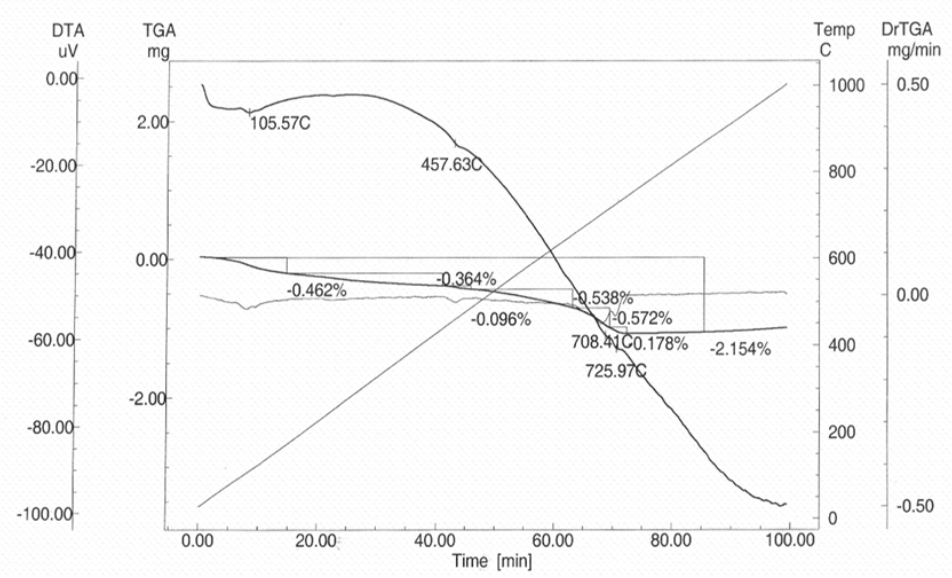


Рисунок 4. Результаты термического исследования портландцемента

По изменению массы образца при нагревании оценивают количественное содержание отдельных фаз цементного камня.

Заключение

Проведённые исследования и испытания сухих напольных покрытий на цементной основе показали, что оценка качества таких материалов должна осуществляться комплексно с использованием как традиционных физико-механических испытаний, так и современных инструментальных методов анализа.

Систематизация действующих стандартов показала наличие трех основных систем стандартизации — ГОСТ, EN и ASTM, каждая из которых имеет свои особенности регламентации методов испытаний. Установлено, что при сопоставимости определяемых

показателей методы испытаний различаются по применяемому оборудованию, форме и размерам образцов, условиям твердения и точности результатов. Для практического применения в условиях действующей нормативной базы Республики Узбекистан целесообразно использование методов ГОСТ с возможностью гармонизации с европейскими стандартами EN в части классификации напольных материалов по EN 13813 [14].

К основным показателям качества относятся подвижность растворной смеси, прочность при сжатии и изгибе, адгезия к основанию, капиллярное водопоглощение. Совокупность этих характеристик определяет долговечность и эксплуатационную надежность напольных покрытий.

Современные методы исследования микроструктуры, включая рентгенофазовый анализ, сканирующую электронную микроскопию, термический анализ и инфракрасную спектроскопию, позволяют детально изучить процессы гидратации цемента, механизм действия минеральных и химических добавок, а также установить взаимосвязь между структурой материала и его эксплуатационными свойствами.

Комплексное применение стандартных методов испытаний и современных аналитических технологий является основой разработки новых высокоэффективных сухих строительных смесей для устройства долговечных, прочных и износостойких цементных напольных покрытий.

Рекомендации по выбору методов испытаний для условий Республики Узбекистан. С учётом действующей нормативной базы, резко континентального климата (значительные перепады температур, низкая влажность воздуха) и реальной оснащённости лабораторий рекомендуется дифференцированный подход:

• для входного контроля на производстве и строительной площадке — методы ГОСТ как наиболее доступные и метрологически обеспеченные: подвижность по ГОСТ 5802–86, прочность при сжатии и изгибе по ГОСТ 31358–2019, адгезия по ГОСТ 31356–2007 (прибор ПСО–МГ4), капиллярное водопоглощение по ГОСТ 12730.3–2020;

• для приёмо-сдаточных и сертификационных испытаний — поэтапное внедрение методов EN: классификация по EN 13813, прочность по EN 13892-2, истираемость по EN 13892-3, адгезия по EN 13892-8, стабильность размеров по EN 13892-9, что обеспечит сопоставимость результатов с зарубежными данными;

• для научных исследований и разработки новых рецептур — комплексное применение XRD, SEM, DTA/TG и FTIR; при отсутствии дорогостоящего оборудования — использование методов ASTM (C109/C109M, C348, C1585, C779/C779M) в рамках совместных исследований;

• с учётом климатических особенностей региона — дополнять стандартные испытания определением прочности после температурной обработки (до +45…+50 °C), оценкой морозостойкости контактной зоны по ГОСТ 31356–2007 и ASTM C666/C666M, обязательным контролем капиллярного водопоглощения и усадочных деформаций.

Для практической реализации рекомендаций целесообразно провести инвентаризацию испытательного оборудования, организовать обучение специалистов методам EN и ASTM, разработать национальное методическое руководство по выбору методов испытаний и предусмотреть поэтапное оснащение базовых лабораторий современным инструментальным оборудованием.

Комплексное применение стандартных методов испытаний и современных аналитических технологий является основой разработки новых высокоэффективных сухих строительных смесей для устройства долговечных, прочных и износостойких цементных напольных покрытий, адаптированных к условиям эксплуатации в Республике Узбекистан.

Список литературы

1. ГОСТ 31357–2007. Смеси сухие строительные на цементном вяжущем. Общие технические условия.
2. ГОСТ 31358–2019. Смеси сухие строительные напольные на цементном вяжущем. Методы испытаний.
3. ГОСТ 31356–2007. Смеси сухие строительные на цементном вяжущем. Методы испытаний.
4. ГОСТ 5802–86. Растворы строительные. Методы испытаний.
5. ГОСТ 31357–2007. Смеси сухие строительные на цементном вяжущем. Общие технические условия.
6. ГОСТ 31358–2019. Смеси сухие строительные напольные на цементном вяжущем. Методы испытаний.
7. ГОСТ 5802–86. Растворы строительные. Методы испытаний.
8. ГОСТ 31356–2007. Смеси сухие строительные на цементном вяжущем. Методы испытаний.
9. ASTM C1708/C1708M-25. Standard Test Methods for Self-leveling Mortars Containing Hydraulic Cements. ASTM International. – ASTM International. – 2025.
10. ASTM C109/C109M-26a. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 50 mm [2 in.] Cube Specimens). ASTM International. – ASTM International.
11. ASTM C348-21. Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars. ASTM International. – ASTM International. – 2021.
12. ASTM C1585-20. Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes. ASTM International. – ASTM International. – 2020.
13. ASTM C779/C779M-19. Standard Test Method for Abrasion Resistance of Horizontal Concrete Surfaces. ASTM International. – ASTM International. – 2019.
14. EN 13813:2002. Screed material and floor screeds – Screed material – Properties and requirements. CEN. – CEN, 2002.
15. EN 13892-2:2002. Methods of test for screed materials – Part 2: Determination of flexural and compressive strength. CEN. – CEN, 2002.

16. EN 13892-3:2014. Methods of test for screed materials – Part 3: Determination of wear resistance – Böhme. CEN. – CEN, 2014.
17. EN 13892-6:2002. Methods of test for screed materials – Part 6: Determination of surface hardness. CEN. – CEN, 2002.
18. EN 13892-8:2002. Methods of test for screed materials – Part 8: Determination of bond strength. CEN. – CEN, 2002.
19. EN 13892-9:2025. Methods of test for screed materials – Part 9: Dimensional stability. CEN. – CEN, 2025.
20. Fan L., Xiong S., Wang W. et al. Effect of Polycarboxylate Admixture on the Performance of Fluorogypsum-Based Self-Leveling Material // Applied Sciences. – 2023. – T. 13, № 23.
21. Ge S. et al. Influence and mechanism analysis of different types of water reducing agents on volume shrinkage of cement mortar // Journal of Building Engineering. – 2023. – T. 76.
22. Gruber D. et al. Performance evaluation of self-leveling mortars using phosphogypsum and white ceramic waste // Revista IBRACON de Estruturas e Materiais. – 2024. – T. 17, № 1.
23. Hewlett P.C., Liska M. Lea's Chemistry of Cement and Concrete. Elsevier. – 2019.
24. ISO 679:2009. Cement – Test methods – Determination of strength. ISO. – ISO, 2009.
25. Mehta P.K., Monteiro P.J.M. Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. McGraw-Hill. – 2006.
26. Neville A.M. Properties of Concrete. Pearson Education. – 2011.
27. Pan Z. et al. Retardation and compressive strength enhancement effect of upcycling waste carrot as bio-admixture for cement mortars // Journal of Building Engineering. – 2022. – T. 54.
28. Scrivener K., Snellings R., Lothenbach B. A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials. CRC Press. – 2018.
29. Wang Y., Wu J., Su L. et al. Effect of Chemical Admixtures on the Working Performance and Mechanical Properties of Cement-Based Self-Leveling Mortar // Buildings. – 2023. – T. 13, № 9.
30. Zong M., Ma H., Yan X. et al. Advances in the Application and Mechanism of Admixtures and Industrial By-Products in Cement-Based Self-Leveling Mortar: A Comprehensive Review // Materials. – 2025. – T. 18, № 8.

References

1. GOST 31357 [Dry building mixtures on cement binder. General specifications]. – 2007. (In Russ.).
2. GOST 31358 [Dry building floor mixtures on cement binder. Test methods]. – 2019. (In Russ.).
3. GOST 31356 [Dry building mixtures on cement binder. Test methods]. – 2007. (In Russ.).
4. GOST 5802–86. [Mortars for construction. Test methods] (In Russ.).
5. GOST 31357 [Dry building mixtures on cement binder. General specifications]. – 2007. (In Russ.).
6. GOST 31358 [Dry building floor mixtures on cement binder. Test methods]. – 2019. (In Russ.).

7. GOST 5802–86. [Mortars for construction. Test methods] (In Russ.).
8. GOST 31356 [Dry building mixtures on cement binder. Test methods]. – 2007. (In Russ.).
9. ASTM C1708/C1708M-25. Standard Test Methods for Self-leveling Mortars Containing Hydraulic Cements. ASTM International. – ASTM International. – 2025.
10. ASTM C109/C109M-26a. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 50 mm [2 in.] Cube Specimens). ASTM International. – ASTM International.
11. ASTM C348-21. Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars. ASTM International. – ASTM International. – 2021.
12. ASTM C1585-20. Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes. ASTM International. – ASTM International. – 2020.
13. ASTM C779/C779M-19. Standard Test Method for Abrasion Resistance of Horizontal Concrete Surfaces. ASTM International. – ASTM International. – 2019.
14. EN 13813:2002. Screed material and floor screeds – Screed material – Properties and requirements. CEN. – CEN, 2002.
15. EN 13892-2:2002. Methods of test for screed materials – Part 2: Determination of flexural and compressive strength. CEN. – CEN, 2002.
16. EN 13892-3:2014. Methods of test for screed materials – Part 3: Determination of wear resistance – Böhme. CEN. – CEN, 2014.
17. EN 13892-6:2002. Methods of test for screed materials – Part 6: Determination of surface hardness. CEN. – CEN, 2002.
18. EN 13892-8:2002. Methods of test for screed materials – Part 8: Determination of bond strength. CEN. – CEN, 2002.
19. EN 13892-9:2025. Methods of test for screed materials – Part 9: Dimensional stability. CEN. – CEN, 2025.
20. Fan L., Xiong S., Wang W. et al. Effect of Polycarboxylate Admixture on the Performance of Fluorogypsum-Based Self-Leveling Material // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13, No. 23.
21. Ge S. et al. Influence and mechanism analysis of different types of water reducing agents on volume shrinkage of cement mortar // Journal of Building Engineering. – 2023. – Vol. 76.
22. Gruber D. et al. Performance evaluation of self-leveling mortars using phosphogypsum and white ceramic waste // Revista IBRACON de Estruturas e Materiais. – 2024. – Vol. 17, No. 1.
23. Hewlett P.C., Liska M. Lea's Chemistry of Cement and Concrete. Elsevier. – 2019.
24. ISO 679:2009. Cement – Test methods – Determination of strength. ISO. – ISO, 2009.
25. Mehta P.K., Monteiro P.J.M. Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. McGraw-Hill. – 2006.
26. Neville A.M. Properties of Concrete. Pearson Education. – 2011.
27. Pan Z. et al. Retardation and compressive strength enhancement effect of upcycling waste carrot as bio-admixture for cement mortars // Journal of Building Engineering. – 2022. – Vol. 54.

28. Scrivener K., Snellings R., Lothenbach B. A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials. CRC Press. – 2018.
29. Wang Y., Wu J., Su L. et al. Effect of Chemical Admixtures on the Working Performance and Mechanical Properties of Cement-Based Self-Leveling Mortar // Buildings. – 2023. – Vol. 13, No. 9.
30. Zong M., Ma H., Yan X. et al. Advances in the Application and Mechanism of Admixtures and Industrial By-Products in Cement-Based Self-Leveling Mortar: A Comprehensive Review // Materials. – 2025. – Vol. 18, No. 8.

Статья поступила в редакцию: 26.09.2026
Статья принята к публикации: 14.10.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 711.4+338.48

DOI: 10.32743/UniTech.2026.151.10.23552

Ревитализация неэксплуатируемых объектов и постиндустриальных территорий региона Кавказских Минеральных Вод: актуальность темы

Долинская Ирина Марковна
проф. кафедры
Градостроительство, Московский архитектурный институт (государственная академия)
Российская Федерация, г. Москва
E-mail: idolinskaya@yandex.ru
Трофимов Олег Сергеевич
магистр архитектуры, Московский архитектурный институт (государственная академия)
Российская Федерация, г. Москва
E-mail: stilyaga1999@yandex.ru
Карпенко Дарья Денисовна
магистр градостроительства, Московский архитектурный институт (государственная академия)
Российская Федерация, г. Москва
E-mail: miss.dashunka200@mail.ru
Давыдова Валерия Алексеевна
магистрант кафедры Градостроительство
Московский архитектурный институт (государственная академия)
Российская Федерация, г. Москва
E-mail: lera-davydova@inbox.ru

The Caucasian Mineral Waters region disused facilities and post-industrial areas revitalization: relevance of the topic

Dolinskaia Irina
professor of the Urban Planning Department Moscow Institute of Architecture (State Academy)
Russia, Moscow
Trofimov Oleg
master of Architecture, Moscow Institute of Architecture (State Academy)
Russia, Moscow
Karpenko Daria
master of Urban Planning, Moscow Institute of Architecture (State Academy)
Russia, Moscow
Davydova Valeria
Master's degree student, Moscow Institute of Architecture (State Academy)
Russia, Moscow

Библиографическое описание: Ревитализация неэксплуатируемых объектов и постиндустриальных территорий региона Кавказских Минеральных Вод: актуальность темы // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Долинская И.М. [и др.]. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23552

Аннотация

В статье рассматриваются вопросы ревитализации санаторно-курортного комплекса Кавказских Минеральных Вод как одного из ключевых направлений развития внутреннего туризма России. Актуальность исследования обусловлена необходимостью поиска новых подходов к использованию исторически сформированной курортной инфраструктуры в условиях роста туристического потока, дефицита объектов размещения, рекреационных пространств и общественных точек притяжения. Особое внимание уделяется проблеме восстановления выведенных из эксплуатации объектов санаторно-курортной сферы и их интеграции в современную городскую среду. Цель исследования заключается в обосновании необходимости комплексной ревитализации объектов курортной инфраструктуры и прилегающих территорий как инструмента устойчивого развития городов-курортов Кавказских Минеральных Вод. Методологическую основу исследования составили анализ государственных стратегических документов и программ развития туризма, изучение нормативно-правовой базы регулирования курортных территорий, а также применение методов сравнительного анализа, территориального планирования и исследования практик ревитализации городских пространств. В рамках работы рассматривается возможность преобразования отдельных неиспользуемых территорий в новые общественные и рекреационные пространства, способные повысить туристическую привлекательность региона. Результаты исследования показывают, что дальнейшее развитие курортного региона невозможно ограничивать только строительством новых объектов. Необходима комплексная трансформация существующей инфраструктуры, включающая восстановление исторически значимых объектов, развитие общественных пространств и формирование новых сценариев взаимодействия санаторно-курортных учреждений с городской средой. Предложенный подход позволяет рассматривать ревитализацию как важный механизм сохранения культурно-пространственного наследия и повышения конкурентоспособности курортных территорий.

Abstract

This article examines the revitalization of the health resort complex in the Caucasian Mineral Waters region, a key area for the development of domestic tourism in Russia. The study is driven by the need to find new approaches to utilizing established resort infrastructure amidst rising tourist numbers and a shortage of accommodation, recreational areas, and public attractions. Particular attention is paid to restoring decommissioned health resort facilities and integrating them into the modern urban environment. The study aims to justify the need for the comprehensive revitalization of resort infrastructure and surrounding areas as a tool for the sustainable development of the Caucasian Mineral Waters resort towns. The methodological framework includes an analysis of state strategic documents and tourism development programs, a review of the regulatory and legal framework governing resort areas, and the application of comparative analysis, spatial planning, and the study of urban space revitalization practices. The paper explores the potential to transform specific unused sites into new public and recreational spaces capable of enhancing the region's appeal to tourists. The findings indicate that the future development of the resort region cannot rely solely on new construction; a comprehensive transformation of existing infrastructure is required. This entails restoring historically significant sites, developing public spaces, and establishing new

modes of interaction between health resort facilities and the urban environment. The proposed approach positions revitalization as a vital mechanism for preserving cultural and spatial heritage while boosting the competitiveness of the resort areas.

Ключевые слова: Кавказские Минеральные Воды, эколого-курортный регион, ревитализаци, санаторно-курортный комплекс, постиндустральные территории.

Keywords: Caucasian Mineral Waters, ecological and resort region, revitalization, health resort complex, post-industrial areas.

Введение

Необходимость поиска вариантов решения проблем в организации санаторно-курортного комплекса и возвращению к практике использования внутритерриториальных ресурсов страны для развития туризма стала очевидна еще в 1990-х, когда профсоюзные и ведомственные санатории и пансионаты для поддержания жизнеспособности объектов стали привлекать к работе кооперативы и частных инвесторов, не имевших ни теоретических знаний, ни практического опыта в этой сфере. Однако в тот момент, на фоне, с одной стороны, упадка в отрасли при нарастании волны потери интереса к внутреннему туризму, с другой – отсутствия опыта взаимодействия акторов в рамках спонтанно возникающих и нерегламентируемых партнерств, сотрудничество не сложилось, а его алгоритмы и модели не сформировались. Равно как не сформировалась и регламентирующая эту совместную деятельность законодательная база.

В последующие годы объекты, перешедшие в частные руки, в абсолютном большинстве случаев, в течение первых 3-х – 5-ти лет переставали справляться с проблемами эксплуатации и запросами турпотока. Отрасль, несмотря на колоссальный природно-ресурсный и культурно-исторический потенциал, по-прежнему приходила в упадок. В результате, к началу 2010-х – в период подготовки к проведению Олимпиады 2014 года в Сочи и сразу после нее – стало очевидно, что внутренний туризм всех направлений остро нуждается в новых подходах и стратегиях долгосрочного развития.

Материалы и методы исследования

Методология исследования построена на рассмотрении в хронологической последовательности принятых в последние десятилетия государственных стратегических документов, национальных проектов и программ, ориентированных на развитие городов-курортов Кавказских Минеральных Вод (далее – КМВ), включая вопросы градообустройства территорий эколого-курортного региона (далее – ЭКР), создания дополнительных общедоступных точек общественного притяжения и рекреации, а также ревитализации выведенных из эксплуатации объектов санаторно-курортного комплекса.

Кроме того, «… понимание того, что аэропорты, как сложный транспортно-логистический объект с развитой производственной зоной и инженерной инфраструктурой, могут быть определены, как индустриальные зоны», позволило расширить предметные границы исследования и рассматривать территорию потенциально – на дальнем горизонте планирования выводимого на другое место аэропорта «Минеральные Воды», как

постиндустриальную, открытую для трансформации в общедоступное рекреационное пространство постиндустриального парка с развитой инфраструктурой объектов культуры, отдыха и спорта. То есть, постаэропортная территория в работе рассматривается также, как подлежащая ревитализации. [4, с.9]

Результаты и обсуждение

Первый государственный документ, в котором были зафиксированы подходы к решению вопросов восстановления системы российских курортов относится к 2017 году: в июле – в разгар туристического сезона – был принят Федеральный закон «О проведении эксперимента по развитию курортной инфраструктуры», в котором, помимо территорий эксперимента были описаны источники и способы его финансирования. Это позволяло говорить о перспективах его реализации. В зону внимания законодателей попали: Республика Крым, Алтайский, Краснодарский и Ставропольский край, Санкт-Петербург, а также федеральная территория «Сириус». [9]

Через 2 года – в сентябре 2019 – перед завершением летнего курортного сезона Распоряжением Правительства была утверждена Стратегия развития туризма в Российской Федерации на период до 2035 года, предусматривавшая интенсификацию отрасли, усиление фокуса на развитие внутреннего туризма и, как следствие, необходимость *увеличения емкости объектов коллективного размещения до 3,1 млн. койко-мест и общее увеличение турпотока до 88 млн. человек в год*. [10] В соответствии с этим документом Кавказские Минеральные Воды становятся одним из важнейших центров концентрации внутреннего турпотока.

Как пишет Д.Д. Карпенко в тексте своей выпускной квалификационной работы (магистерской диссертации), защищенной в МАРХМ в 2025 году на тему «Стратегия пространственного развития региона Кавказских Минеральных Вод»: «… в 2023 году (в период с января по ноябрь) по данным, приведенным на сайте Росстата и опубликованным ТАСС, курорты ЭКР КМВ посетили около 2,8 млн. человек. [14] Целевые показатели, указанные в мастер-плане агломерации Кавказских Минеральных Вод на 2030 год зафиксированы на цифре 2,7 млн. человек, и на 2035 – 3,2 млн. [2] [В тоже время] «… по данным Росстата, ожидаемый приток туристов в 2035 году составит более 6 млн человек». [14] [При этом], число отдыхающих, заявленное в ряде региональных документов и публикаций, ориентируется на цифру 9 млн. человек в год к 2040 году. [13] То есть, показатель 5 млн. человек в год, вероятно, можно рассматривать, как целевой для первого этапа реализации программы (до 2035 года), анонсированной в Доктрине развития региона Кавказских Минеральных Вод. [5]» [7, с.15].

В 1992 году было принято Постановление Правительства «Об особо охраняемом эколого-курортном регионе Российской Федерации – Кавказских Минеральных Водах» [11], почти через 30 лет усиленное Распоряжением Правительства Ставропольского края от 13 июня 2019 года «Об утверждении Концепции сохранения, восстановления и развития особо охраняемого эколого-курортного региона Российской Федерации – Кавказские Минеральные Воды в границах территории Ставропольского края» [12]. В соответствии с текстом Постановления Правительства 1992 года в состав эколого-курортного региона КМВ входят:

1. в границах Ставропольского края: города Георгиевск, Минеральные Воды, Железноводск, Пятигорск, Ессентуки, Кисловодск, Лермонтов, а также районы Минераловодский (курортная местность Нагута), Георгиевский и Предгорный;

2. в Кабардино-Балкарской Республике – Зольский район (Долина Нарзана);

3. в Карачаево-Черкесской Республике – Малокарачаевский и Прикубанский районы. [11]

Из всех вышеперечисленных городов и расположенных в границах ЭКР КМВ населенных пунктов, несмотря на прямое или опосредованное через ведение курортных или обеспечивающих курорты бизнесов, только 4 имеют статус городов-курортов. Это Железноводск, Пятигорск, Ессентуки и Кисловодск. Статус Минеральных Вод с тех пор, как в 1934 году город, с 1925 годя являющийся еще и «воздушными воротами КавМинВод», рассматривался в качестве столицы региона остается неопределенным. [6]

Еще через 2 года после утверждения Стратегии развития туризма – в 2021 было выпущено Распоряжение Правительства «О перечне мероприятий по комплексному развитию городов-курортов региона Кавказские Минеральные Воды до 2030 года» [8]. Содержание этого и всех предыдущих документов, равно, как и заявленные целевые показатели, позволяют обоснованно предположить, что помимо строительства новых санаторно-курортных и туристических комплексов, открытия новых внутрирегиональных территорий развития туризма и курортных практик (например, Всесезонного туристско-рекреационного комплекса «Эльбрус» – проект ГАУ «Институт Генплана Москвы», 2023 – 2024 год), для достижения к 2040 году поставленных целевых показателей турпотока в границах ЭКР КМВ необходимо восстановление выведенных из эксплуатации в 1990-е – 2000-е годы объектов санаторно-курортного комплекса, общедоступной рекреации и туристической инфраструктуры. При этом следует учитывать и то, что «… сформировавшаяся за более чем 200 лет система городов-курортов и курортных территорий обладает огромным туристическим потенциалом, но сегодня испытывает постоянные трудности, так как на фоне растущего спроса на прием и обслуживание, вместимости санаториев и гостиничных комплексов, а также точек общественного притяжения, очевидно, не хватает. Города не справляются с потоками отдыхающих в сезоны пиковых нагрузок, а в последние годы (между осенью 2020 и весной 2025) и в межсезонье. И, если в высокие сезоны – это вопрос отсутствия мест в санаториях, гостиницах всех категорий и курортных лечебницах, то в остальное время, в том числе – в периоды длинных праздничных выходных (более трех дней) – это не столь очевидная летом проблема разнообразия и отсутствия достаточного количества объектов досуга». [7, с.14-15] В том числе, это касается и недостатка мест общедоступных территорий рекреации: скверов, бульваров, парков и городских садов с развитой инфраструктурой проведения досуга – от выставочных комплексов до всесезонных спортивных объектов, открытых для публики.

Кроме того, изменение практик и сценариев организации отдыха в санаторно-курортных зонах и городах-курортах, равно, как и трансформация части санаториев и пансионатов в гостиницы всех типов и категорий или в гостевые дома (в том числе, и из-за невозможности организации санаторно-лечебного комплекса и/или объектов общественного питания по модели полного пансиона на внутрисанаторной территории), потребует восстановления неэксплуатируемых сегодня спортивно-зрелищных и театрально-концертных

объектов, а также разработки программ взаимодействия мест размещения с этими объектами, местами торговли и общественного питания, расположенными в границах комфортной пешеходной доступности (в пределах 5 минут) от них. В этом случае речь может идти, как о полной коллаборации гостиниц и объектов питания, по аналогам 1970-х годов до сих пор принятых во многих странах (таким примером в городах-курортах КМВ может служить сотрудничество санатория «Солнечный» и кафе «Морозко» в Кисловодске в период между 1972 и 1995 годом), так и просто о рассмотрении вариантов взаиморасположения объектов в границах 5-тиминутной пешеходной доступности друг от друга. Это же касается как зон внутригородской рекреации, так и курортных поликлиник. То есть, документы территориального планирования должны предусматривать не просто восстановление объектов и их функций, а ревитализацию городского пространства городов-курортов, исторически сформированного объектами санаторно-курортной инфраструктуры, а также ревитализацию курортоориентированных и рекреационных объектов на прилегающих к этим городам территориях.

По определению, приведенному профессором Уральской государственной архитектурно-художественной академии, кандидатом архитектуры А.А. Барабановым в тексте «Социально-культурные и семантические принципы ревитализации индустриального наследия»: «Ревитализация – это процесс воссоздания и оживления городского пространства. Основной принцип ревитализации заключается в раскрытии новых возможностей старых территорий и построек. В процессе ревитализации используется комплексный подход с целью сохранения самобытности, аутентичности, идентичности и исторических ресурсов городской среды». [1] И несмотря на то, что в публикации речь идет об индустриальном наследии, на нее же ссылаются и авторы статьи «Ревитализация городского пространства», анализируя опыт «усиления туристической привлекательности исторических районов» во многих странах и, в том числе, в России [3].

Выводы

Все вышесказанное позволяет говорить о том, что в применении к ситуации восстановления туристическо-курортной привлекательности городов КМВ, ревитализация – это, действительно, «процесс воссоздания и оживления городского пространства», в основе которого – восстановление выведенных из эксплуатации и деградирующих санаторно-курортных объектов и прилегающих к ним территорий, а также взаимодействующих с ними объектов общественного притяжения, и их реинтеграция в существующую среду города и всего эколого-курортного региона.

Список литературы

1. Барабанов, А.А. Социально-культурные и семантические принципы ревитализации индустриального наследия / А.А. Барабанов // Эко-потенциал. – 2013. – № 3–4. – С. 237–248.

2. ГАУ «Институт Генплана Москвы». Разработка стратегии пространственного развития (мастер-плана) агломерации Кавказских Минеральных Вод с детализацией проектных решений для г-к. Ессентуки, г-к. Пятигорск, г-к. Железноводск. 2.1. Концепция пространственного развития агломерации Кавказских Минеральных Вод. Отчет этапа 2. – С. 21–28. – ГАУ «Институт Генплана Москвы».
3. Головин К.А., Копылов А.Б., Свандлунова А.Г. Ревитализация городского пространства / Известия ТулГУ. Технические науки. 2023. Вып. 11 [Электронный ресурс] // Научная электронная библиотека Киберленинка. – 2023. – С. 94–97. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/revitalizatsiya-gorodskogo-prostranstva/viewer (дата обращения: 24.09.2026).
4. Давыдова В.А. Постиндустриальный парк как инструмент развития постаэропортных территорий (на примере территории аэропорта «Минеральные Воды»): магистерская выпускная квалификационная работа: квалификация магистр по направлению подготовки 07.04.01 – Архитектура / Давыдова Валерия Алексеевна; научный руководитель И.М. Долинская; Московский архитектурный институт. – Москва, 2026 – Автореферат. [Доступен в Электронной библиотеке МАРХИ]. – 2026.
5. Доктрина развития региона Кавказских Минеральных Вод [Электронный ресурс]. // Санатории КМВ. Сайт. URL: http://www.regionkmv.ru/projects/strategy_0.html (дата обращения: 24.09.2026).
6. Долинская И.М., Трофимов О.С., Карпенко Д.Д., Орлова В.О. Город Минеральные Воды, как административный центр эколого-курортного региона Кавказских Минеральных Вод // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. Долинская И.М. [и др.]. – 2025. – DOI: 10.32743/UniTech.2025.132.3.19520 [Электронный ресурс]. URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/19520 (дата обращения: 24.09.2026).
7. Карпенко Д.Д. Стратегия пространственного развития региона Кавказских Минеральных Вод: магистерская выпускная квалификационная работа: квалификация магистр по направлению подготовки 07.04.04 – Градостроительство / Карпенко Дарья Денисовна; научный руководитель И.М. Долинская; Московский архитектурный институт. – Москва, 2025 – Основной текст, Автореферат, графическая часть. – 2025.
8. О перечне мероприятий по комплексному развитию городов-курортов региона Кавказские Минеральные Воды до 2030 года. Распоряжение Правительства РФ от 11 сентября 2021 г. № 2540-р.
9. О проведении эксперимента по развитию курортной инфраструктуры: Федеральный закон от 29.07.2017 N 214-ФЗ (ред. от 28.04.2023) [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс: справочно-правовая система. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_221174/4fdc493704d123d418c32ed33872ca5b3fb16936/ (дата обращения 24.09.2026).
10. О Стратегии развития туризма в РФ на период до 2035 г. Распоряжение Правительства РФ от 20 сентября 2019 г. № 2129-р [Электронный ресурс] // Грарант. Информационно-правовая система. URL: https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/72661648/ (дата обращения 24.09.2026).

11. Об особо охраняемом эколого-курортном регионе Российской Федерации – Кавказских Минеральных Водах. Постановление Правительства Российской Федерации от 6 июля 1992 года N 462 [Электронный ресурс] // Гарант. Информационно-правовая система. URL: https://base.garant.ru/2157640/ (дата обращения 24.09.2026).
12. Об утверждении Концепции сохранения, восстановления и развития особо охраняемого эколого-курортного региона Российской Федерации – Кавказские Минеральные Воды в границах территории Ставропольского края. Распоряжение Правительства Ставропольского края от 13 июня 2019 г. № 219-рп.
13. Пешков Н. Власти Ставрополья заявили о резком расширении курортной зоны Кавминвод [Электронный ресурс]. // Российская газета. Сайт. 23.01.2024. – 2024. URL: https://rg.ru/2024/01/23/reg-skfo/vlasti-stavropolia-zaiavili-o-rezkom-rasshirenii-kurortnoj-zony-kavminvod.html (дата обращения: 24.09.2026).
14. Рост турпотока вдвое спрогнозировали на курортах Кавказских Минеральных Вод к 2035 году [Электронный ресурс]. // ТАСС. Информационное агентство. Сайт. 18.01.2024. – 2024. URL: https://tass.ru/ekonomika/19760545 (дата обращения: 24.09.2026).

References

1. Barabanov A.A. [Socio-Cultural and Semantic Principles of Industrial Heritage Revitalization] // Eko-potentsial. – 2013. – No. 3–4. (In Russ.).
2. [Development of a Spatial Development Strategy (Master Plan) for the Caucasian Mineral Waters Agglomeration with Detailed Design Solutions for Yessentuki, Pyatigorsk, and Zheleznovodsk. 2.1. Concept of Spatial Development of the Caucasian Mineral Waters Agglomeration. Report of Stage 2]. – S. 21–28. – GAU «Institut Genplana Moskvy» (In Russ.).
3. Golovin K.A., Kopylov A.B., Svandlunova A.G. [Revitalization of Urban Space] / Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki. 2023. Vyp. 11 [Электронный ресурс]. // Nauchnaya elektronnaya biblioteka Kiberleninka. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/revitalizatsiya-gorodskogo-prostranstva/viewer (accessed: 24.09.2026). (In Russ.).
4. Davydova V.A. [Post-Industrial Park as a Tool for Development of Post-Airport Territories (Using the Example of Mineral Waters Airport Territory): Master's Thesis: Master's Qualification in the Field of Study 07.04.01 – Architecture] / Davydova Valeriya Alekseevna; nauchnyj rukovoditel' I.M. Dolinskaya; Moskovskij arkhitekturnyj institut. – Moskva, 2026 – Avtoreferat. [Dostupen v Elektronnoj biblioteke MARKhI]. – 2026 (In Russ.).
5. [Doctrine for the Development of the Caucasian Mineral Waters Region] [Электронный ресурс]. // Sanatorii KMV. Sajt. – URL: http://www.regionkmv.ru/projects/strategy_0.html (accessed: 24.09.2026). (In Russ.).
6. Dolinskaya I.M., Trofimov O.S., Karpenko D.D., Orlova V.O. [The City of Mineral Waters as an Administrative Center of the Ecological Resort Region of Caucasian Mineral Waters] // Universum: tekhnicheskie nauki: elektron. nauchn. zhurn. Dolinskaya I.M. [i dr.]. – 2025. – DOI: 10.32743/UniTech.2025.132.3.19520 [Электронный ресурс]. – URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/19520 (accessed: 24.09.2026). (In Russ.).

7. Karpenko D.D. [Spatial Development Strategy for the Caucasian Mineral Waters Region: Master's Thesis: Master's Qualification in the Field of Study 07.04.04 – Urban Planning] / Karpenko Dar'ya Denisovna; nauchnyj rukovoditel' I.M. Dolinskaya; Moskovskij arkhitekturnyj institut. – Moskva, 2025 – Osnovnoj tekst, Avtoreferat, graficheskaya chast'. – 2025 (In Russ.).
8. O perechne meropriyatij po kompleksnomu razvitiyu gorodov-kurortov regiona Kavkazskie Mineral'nye Vody do 2030 goda. [Order of the Government of the Russian Federation of September 11, 2021 No. 2540-r] (In Russ.).
9. [On Conducting an Experiment on the Development of Resort Infrastructure: Federal Law of July 29, 2017 No. 214-FZ (as amended on April 28, 2023)] // Konsul'tantPlyus: spravochno-pravovaya sistema. – 2023 [Электронный ресурс]. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_221174/4fdc493704d123d418c32ed33872ca5b3fb16936/ (accessed: 24.09.2026). (In Russ.).
10. O Strategii razvitiya turizma v RF na period do 2035 g. [Order of the Government of the Russian Federation of September 20, 2019 No. 2129-r] // Grarant. Informatsionno-pravovaya sistema. – 2019 [Электронный ресурс]. – URL: https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/72661648/ (accessed: 24.09.2026). (In Russ.).
11. [Resolution of the Government of the Russian Federation of July 6, 1992 No. 462] // Grarant. Informatsionno-pravovaya sistema. – 1992 [Электронный ресурс]. – URL: https://base.garant.ru/2157640/ (accessed: 24.09.2026). (In Russ.).
12. Ob utverzhdenii Kontseptsii sokhraneniya, vosstanovleniya i razvitiya osobo okhranyaemogo ekologo-kurortnogo regiona Rossijskoj Federatsii – Kavkazskie Mineral'nye Vody v granitsakh territorii Stavropol'skogo kraya. [Order of the Government of Stavropol Krai of June 13, 2019 No. 219-rp] (In Russ.).
13. Peshkov N. [Stavropol Authorities Announced a Sharp Expansion of the Caucasian Mineral Waters Resort Zone] [Электронный ресурс]. // Rossijskaya gazeta. Sajt. 23.01.2024. – 2024. – URL: https://rg.ru/2024/01/23/reg-skfo/vlasti-stavropolia-zaiavili-o-rezkom-rasshirenii-kurortnoj-zony-kavminvod.html (accessed: 24.09.2026). (In Russ.).
14. [Tourist Flow Growth Predicted to Double at Caucasian Mineral Waters Resorts by 2035] [Электронный ресурс]. // TASS. Informatsionnoe agentstvo. Sajt. 18.01.2024. – 2024. – URL: https://tass.ru/ekonomika/19760545 (accessed: 24.09.2026). (In Russ.).

Статья поступила в редакцию: 16.08.2026
Статья принята к публикации: 17.10.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 624.15+577.4+338.2

DOI: 10.32743/UniTech.2026.151.10.23602

Критерии оценки влияния подземного строительства на городскую экосистему и методы его минимизации

Киптенко Роман Юрьевич
независимый исследователь
Российская Федерация, г. Москва
E-mail: keeptenko@gmail.com

Criteria for assessing the impact of underground construction on the urban ecosystem and methods for its mitigation

Kiptenko Roman
independent researcher
Russian Federation, Moscow

Аннотация

Цель исследования состоит в систематизации критериев оценки влияния подземного строительства на городскую экосистему и обосновании методов снижения возникающих экологических, геотехнических и социально-экономических рисков. Исследование основано на сравнительном анализе научных публикаций, материалов территориального планирования и работ, посвященных использованию городского подземного пространства, изменению грунтовых вод, деформациям земной поверхности и экологическим последствиям строительства. Выделены шесть групп критериев: гидрологические, геотехнические, загрязняющие и ресурсные, биологические, градостроительные и социально-экономические. Предложено проводить оценку на предпроектном, строительном и эксплуатационном этапах с обязательным сопоставлением фактических показателей с исходными и предельно допустимыми значениями. Сформирована последовательность мероприятий по минимизации воздействия, включающая выбор участка и глубины размещения, инженерную защиту, снижение загрязнения, инструментальный мониторинг и восстановление нарушенных территорий. Предложен интегральный индекс экологического влияния, позволяющий сопоставлять варианты проекта и динамику состояния среды. Сделан вывод о необходимости раннего учета природных ограничений и включения подземных объектов в систему городского планирования. Практическая значимость подхода связана с возможностью его

Библиографическое описание: Киптенко Р.Ю. Критерии оценки влияния подземного строительства на городскую экосистему и методы его минимизации // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23602

применения при экологическом обосновании подземных сооружений, выборе защитных мероприятий и контроле наиболее чувствительных компонентов городской среды в ходе строительства.

Abstract

The purpose of the study is to systematize criteria for assessing the impact of underground construction on the urban ecosystem and to substantiate methods for reducing related environmental, geotechnical, and socioeconomic risks. The study is based on a comparative analysis of scientific publications, territorial planning materials, and studies addressing urban underground space, groundwater changes, ground deformation, and environmental consequences of construction. Six groups of criteria are identified: hydrological, geotechnical, pollution and resource-related, biological, urban planning, and socioeconomic. The assessment is proposed for the pre-design, construction, and operational stages, with mandatory comparison of actual indicators with baseline and permissible values. A sequence of impact mitigation measures is developed, including site and depth selection, engineering protection, pollution reduction, instrumental monitoring, and restoration of disturbed areas. An integrated environmental impact index is proposed to compare project alternatives and changes in environmental conditions. The results confirm the importance of considering natural constraints at an early stage and integrating underground facilities into urban planning processes.

Ключевые слова: подземное строительство, городская экосистема, подземное пространство, грунтовые воды, осадка поверхности, экологический мониторинг, устойчивое развитие города.

Keywords: underground construction, urban ecosystem, underground space, groundwater, ground settlement, environmental monitoring, sustainable urban development.

Введение

Увеличение плотности городской застройки повышает потребность в размещении транспортных объектов, парковок, инженерных сетей и технических помещений под землей. Так, использование подземного пространства уменьшает нагрузку на дефицитные наземные территории, однако связано с необратимым преобразованием геологической среды. По этой причине подземное пространство должно рассматриваться как ограниченный городской ресурс, использование которого требует согласования с долгосрочными направлениями территориального развития [10].

В частности, подземные сооружения позволяют решать транспортные и инфраструктурные задачи современных городов, но способны изменять движение грунтовых вод, напряженное состояние массива, устойчивость зданий и условия функционирования наземных территорий. Риски затопления подземной инфраструктуры и необходимость учета климатических воздействий рассматриваются в современных исследованиях [1]. Экологическая оценка проекта не должна ограничиваться объемом выбросов и строительных отходов, т.к. целесообразно учитывать изменения, возникающие под землей и проявляющиеся на поверхности спустя продолжительный период.

Цель исследования состоит в систематизации критериев оценки влияния подземного строительства на городскую экосистему и определении методов его минимизации.

Материалы и методы

Исследование основано на анализе научных публикаций по планированию городского подземного пространства, гидрогеологии, геотехнике и экологической оценке. Применялись методы сравнения, группировки и содержательного обобщения. Критерии отбирались по трем признакам: измеримость, связь с подземным строительством и возможность использования результата при выборе защитных мероприятий. Сопоставимость критериев при интегральной оценке обеспечивается нормированием исходных показателей и последующим объединением оценок внутри каждой группы.

Оценку предлагается проводить относительно исходного состояния территории. До начала работ фиксируются уровни грунтовых вод, параметры грунтов, состояние зданий, растительности, водных объектов, воздуха и акустической среды. В период строительства контролируются отклонения, а после ввода объекта оценивается устойчивость достигнутого состояния.

Результаты и обсуждение

Экологические последствия подземного строительства формируются на нескольких взаимосвязанных уровнях. В работах, посвященных вопросам городского подземного пространства, отмечается необходимость учитывать удобство городской среды, доступность территорий, состояние инфраструктуры и долгосрочные условия развития города [6]. Исследования устойчивого использования подземного пространства также показывают значимость долгосрочного планирования, сохранения подземных ресурсов и учета интересов будущего городского развития [3]. Поэтому критерии должны охватывать природные, технические и социально-экономические характеристики (табл. 1).

Таблица 1. Критерии оценки влияния подземного строительства на городскую экосистему

Группа критериев	Оцениваемые показатели	Возможные последствия
Гидрологические	уровень и направление движения грунтовых вод; водоприток; радиус понижения; качество воды	подтопление или осушение территории; изменение водообмена; загрязнение вод
Геотехнические	осадка поверхности; горизонтальные перемещения; деформации зданий; вибрация; устойчивость массива	повреждение сооружений и коммуникаций; образование трещин; нарушение устойчивости грунта
Загрязнение и ресурсы	пыль; шум; качество почвы; строительные воды; объем извлеченного грунта; энергопотребление	ухудшение состояния воздуха и почвы; образование отходов; рост ресурсных затрат
Биологические	состояние растительности; площадь нарушенных участков; условия обитания животных; восстановление озеленения	повреждение корневых систем; сокращение зеленых зон; изменение мест обитания
Градостроительные	нарушение наземного использования; доступность территории; срок восстановления поверхности	ограничение городской мобильности; ухудшение качества общественных пространств
Социально-экономические	жалобы населения; риски для здоровья; ущерб зданиям; затраты на восстановление	рост расходов; снижение безопасности и качества городской среды

При этом существует связь между источниками воздействия, группами критериев и итоговым решением. Исходными факторами выступают выемка грунта, водопонижение, работа техники, транспортирование материалов и эксплуатация объекта. Их последствия оцениваются по показателям таблицы 1, после чего определяется допустимость воздействия и состав защитных мероприятий (см. рис. 1):

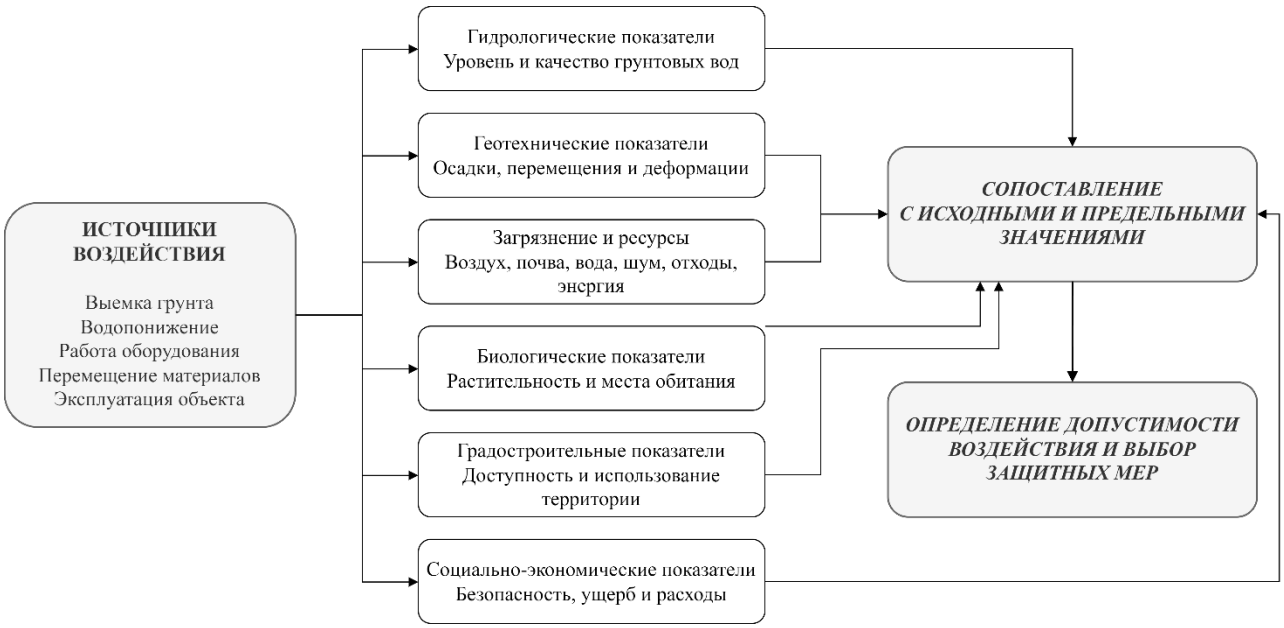


Рисунок 1. Система оценки влияния подземного строительства на городскую экосистему

Отметим, что социально-экологические потери могут быть связаны с изменением запасов грунтовых вод, геологических ресурсов, состояния организмов, исторической среды и возможности последующего использования подземного пространства [7]. Поэтому решение о размещении объекта должно учитывать ценность сохраняемых ресурсов и последствия для будущих проектов.

Особый интерес представляют гидрологические критерии; дренирование тоннелей способно приводить к снижению уровня грунтовых вод, изменению водного баланса, свойств почвы и состояния растительности [5]. Опыт Милана подтверждает, что изменение уровня грунтовых вод способно непосредственно взаимодействовать с подземными сооружениями и инфраструктурой, поэтому гидрогеологический мониторинг должен быть связан с оценкой эксплуатационных рисков [2]. Для участков со сложными гидрогеологическими условиями необходимо определять допустимое понижение уровня воды, контролировать водоприток и предусматривать противофильтрационные мероприятия.

Геотехническая оценка основывается на наблюдении за осадками, горизонтальными перемещениями, деформациями зданий и состоянием коммуникаций. Контроль должен начинаться до строительства, поскольку исходные дефекты необходимо отличать от изменений, вызванных работами. При приближении показателей к предупредительным значениям корректируются скорость проходки, давление на забой, параметры крепления и порядок водопонижения.

Минимизация воздействия предусматривает пять взаимосвязанных направлений:

1. выбор участка и глубины размещения с учетом гидрогеологических и градостроительных ограничений;

2. применение герметизации, предварительного закрепления грунта и регулируемого водоотлива;

3. снижение шума, пыли и вибрации, очистку строительных вод и контролируемое обращение с извлеченным грунтом;

4. инструментальный мониторинг грунтовых вод, поверхности, зданий и инженерных сетей;

5. восстановление покрытий, почвы и растительности после завершения работ.

Анализ временных рядов грунтовых вод и пространственная группировка участков позволяют выделять зоны с различными режимами и устанавливать для них отдельные правила подземного строительства [8], что повышает обоснованность решений и позволяет сосредоточить наблюдение на территориях с повышенной чувствительностью.

Последовательность управления воздействием представлена на рис. 2. При превышении допустимого значения работы должны быть пересмотрены: уточняется причина отклонения, изменяется технология, усиливаются защитные мероприятия и проводится повторная оценка. Продолжение строительства без изменений допускается при сохранении показателей в установленных пределах

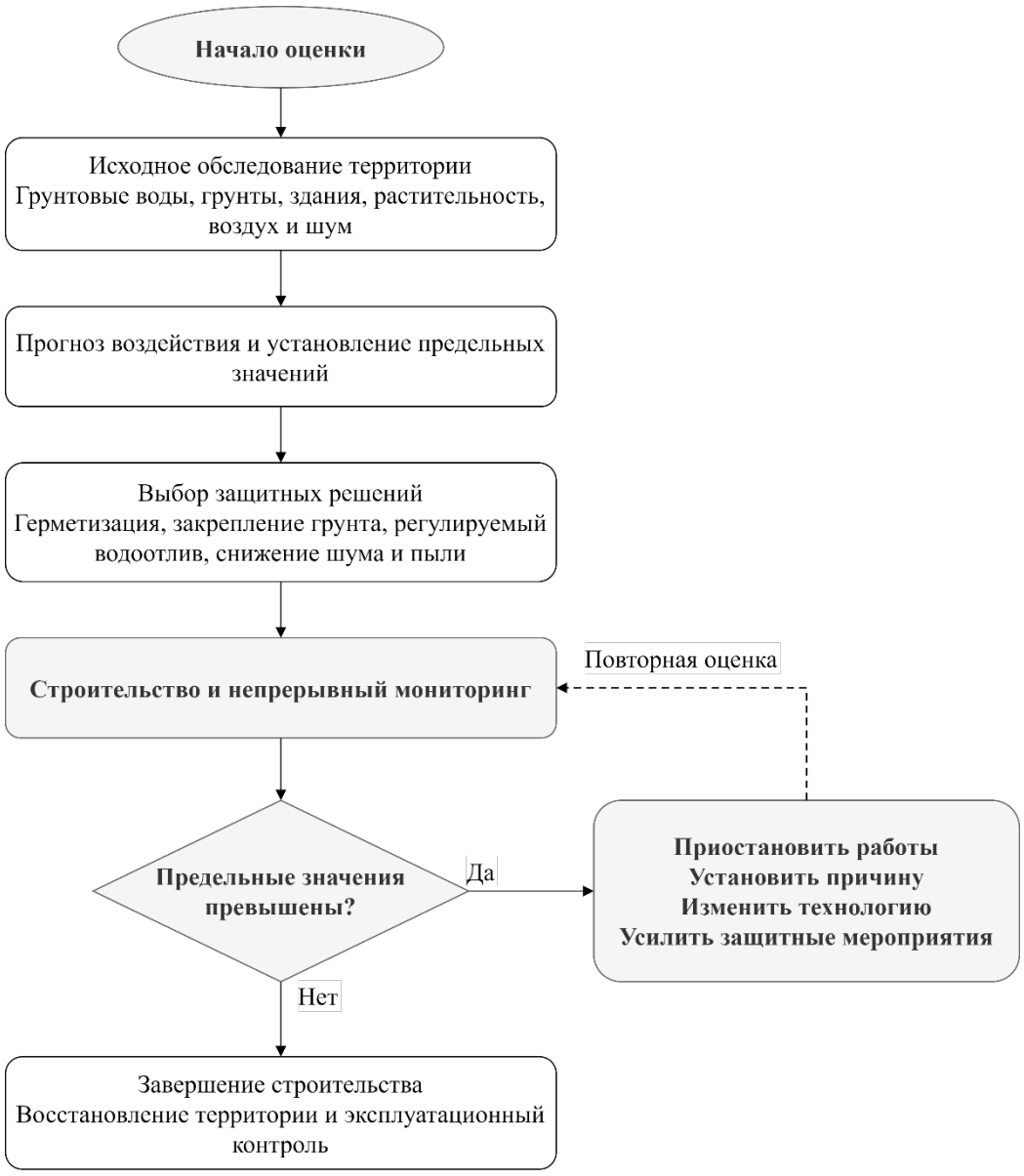


Рисунок 2. Алгоритм минимизации воздействия подземного строительства на городскую экосистему

Стоит указать, что практический интерес представляет опыт Хельсинки; городской подземный генеральный план регулирует размещение крупных подземных объектов, транспортных тоннелей и их соединений. При выборе территорий учитываются наземное использование, транспортная доступность, собственность, ландшафтные и природоохранные характеристики [9]. Сходный принцип реализован в методе Deep City, где пространственное планирование подземной части города связывается с учетом подземных ресурсов и долгосрочной ценности вариантов их использования [4]. Опыт Хельсинки показывает, что снижение экологических рисков начинается на стадии городского планирования, до разработки отдельного строительного проекта.

Моделируя совокупное воздействие подземного строительства, предлагается использовать интегральный индекс экологического влияния, объединяющий шесть групп критериев, представленных в таблице 1:

$$I_{ue} = \sum_{i=1}^{6} w_i K_i,$$

где I_{ue} – интегральный индекс влияния подземного строительства на городскую экосистему; K_i – нормированная оценка соответствующей группы критериев; w_i – вес группы критериев, причем:

$$\sum_{i=1}^{6} w_i = 1.$$

Нормирование показателей, увеличение которых свидетельствует об усилении отрицательного воздействия, выполняется по формуле:

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}},$$

где x_{ij} – фактическое значение показателя; $x_{\min}$ и $x_{\max}$ – минимальное и предельно допустимое значения. При отсутствии обоснованных экспертных оценок группам могут присваиваться равные веса, составляющие 1/6. Если проект реализуется на территории с повышенной гидрогеологической или геотехнической чувствительностью, веса соответствующих групп увеличиваются с последующим повторным нормированием.

В данной формуле z соответствует нормированной оценке отдельного показателя, а индексы i и j обозначают соответственно группу критериев и показатель внутри группы. Границы нормирования устанавливают отдельно для каждого показателя. Для характеристик, увеличение которых отражает улучшение состояния среды, результат расчета вычитается из единицы. Формула применима при $x_{max} > x_{min}$; полученные оценки ограничиваются диапазоном от 0 до 1.

Нормированные показатели в пределах каждой группы предлагается объединять путем вычисления среднего арифметического при равной значимости показателей:

$$K_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} z_{ij}.$$

Здесь n_i – число показателей, включенных в i-ю группу. При наличии обоснованных экспертных оценок допускается использование внутригрупповых весов, сумма которых равна единице.

Значения индекса предлагается интерпретировать следующим образом:

от 0 до 0,20 включительно – низкое воздействие;

свыше 0,20 до 0,40 включительно – умеренное;

свыше 0,40 до 0,60 включительно – существенное;

свыше 0,60 до 0,80 включительно – высокое;

свыше 0,80 до 1,00 включительно – критическое воздействие.

При этом интегральная оценка не отменяет отдельного контроля показателей, превышающих установленные пределы, поскольку низкие значения одних критериев не должны компенсировать критические гидрологические или геотехнические отклонения.

Приведенные границы составляют ориентировочную авторскую шкалу и подлежат уточнению при проверке метода на фактических данных. При превышении обязательных предельных значений отдельный показатель рассматривается самостоятельно вне зависимости от величины интегрального индекса.

Результативность (динамика реализации) защитных мероприятий определяется путем сопоставления значений индекса до и после их реализации:

$$E_m = \frac{I_{ue}^0 - I_{ue}^1}{I_{ue}^0} \cdot 100\%,$$

где I_{ue}^0 – исходный уровень воздействия, а I_{ue}^1 – уровень после применения защитных решений. Предлагаемый индекс позволяет сопоставлять варианты проекта, выявлять наиболее значимые источники риска и оценивать изменение экологической нагрузки на разных этапах строительства.

Относительное снижение рассчитывается при положительном исходном значении индекса. При нулевом исходном уровне используют абсолютное изменение показателя.

Заключение

Таким образом, влияние подземного строительства на городскую экосистему выражается в изменении грунтовых вод, деформации массива, загрязнении среды, нарушении растительности и временном ограничении использования наземных территорий. Для оценки предложены шесть групп критериев, охватывающих природные, технические и социально-экономические последствия.

Основными условиями минимизации воздействия являются исходное обследование, прогнозирование изменений, установление предельных значений, постоянный мониторинг и корректировка строительных решений. Завершающим этапом становится восстановление нарушенных поверхностей и контроль состояния территории после ввода объекта. Включение подземных сооружений в территориальное планирование позволяет предупреждать конфликты между объектами и сохранять возможности дальнейшего развития городской среды.

Список литературы

1. Broere W., Mitew-Czajewska M. Urban underground space for resilient cities // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2026. – T. 170. – Art. 107412. – DOI: 10.1016/j.tust. 2025.107412.
2. Gattinoni P., Scesi L. The groundwater rise in the urban area of Milan (Italy) and its interactions with underground structures and infrastructures // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2017. – T. 62. – P. 103–114. – DOI: 10.1016/j.tust.2016.12.001.

3. Hu W., Dong J., Chen Z., Ren R. Linking underground space development with sustainable urban futures: Research trends and knowledge framework // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2026. – T. 168, Ч. 2. – Art. 107227. – DOI: 10.1016/j.tust.2025.107227.
4. Li H.-Q., Parriaux A., Thalmann P., Li X.-Z. An integrated planning concept for the emerging underground urbanism: Deep City Method, Part 1 – concept, process and application // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2013. – T. 38. – P. 559–568. – DOI: 10.1016/j.tust.2013.04.010.
5. Liu X., Zhuang Y., Zhou X., Liu L., Chen H., Deng J., Xu B., Deng Z. Effect of groundwater decline on plant induced by tunnel excavation and calculation of ecological water level based on SPAC model // Journal of Intelligent Construction. – 2024. – T. 2, № 2. – Art. 9180010. – DOI: 10.26599/JIC.2024.9180010.
6. Peng F.-L., Dong Y.-H., Wang W.-X., Ma C.-X. The next frontier: data-driven urban underground space planning orienting multiple development concepts // Smart Construction and Sustainable Cities. – 2023. – T. 1. – DOI: 10.1007/s44268-023-00003-5.
7. Qiao Y.-K., Peng F.-L., Sabri S., Rajabifard A. Socio-environmental costs of underground space use for urban sustainability // Sustainable Cities and Society. – 2019. – T. 51. – DOI: 10.1016/j.scs.2019.101757.
8. Sartirana D., Rotiroti M., Bonomi T., De Amicis M., Nava V., Fumagalli L., Zanotti C. Data-driven decision management of urban underground infrastructure through groundwater-level time-series cluster analysis: the case of Milan (Italy) // Hydrogeology Journal. – 2022. – T. 30. – P. 1157–1177. – DOI: 10.1007/s10040-022-02494-5.
9. Vähäaho I. Urban Underground Space: Sustainable Property Development in Helsinki. – 2nd updated ed. (Urban Environment Publications 2018:11). – Helsinki: City of Helsinki, Urban Environment Division, 2018. – 52 P.
10. Wu Y., Wen H., Fu M. A Review of Research on the Value Evaluation of Urban Underground Space // Land. – 2024. – T. 13, № 4. – Art. 474. – DOI: 10.3390/land13040474.

Статья поступила в редакцию: 08.06.2026
Статья принята к публикации: 25.06.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 666.973.6

DOI: 10.32743/UniTech.2026.151.10.23111

Влияние поликарбоксилатной добавки на прочность пенозолобетона

Сатторов Зафар Мурадович
проф. кафедры
Строительство и инженерия окружающей среды Ташкентский архитектурно-строительный университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: mr.s.zafar@mail.ru

Мадраймов Нийетбай Амангелдиевич
докторант кафедры
Строительство и инженерия окружающей среды Ташкентский архитектурно-строительный университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: madraymovniko@gmail.com

The effect of polycarboxylate additives on the strength of foam ash concrete

Sattorov Zafar Muradovich
professor of the department Construction and environmental engineering Tashkent University of Architecture and Civil Engineering
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Madraymov Niyetbay Amangeldievich
Doctoral student of the department Construction and environmental engineering Tashkent University of Architecture and Construction
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

В данной работе исследовано влияние поликарбоксилатного суперпластификатора ZAKI DUO 260 на формирование прочностных характеристик пенозолобетона, изготовленного на основе золы-уноса Ангренской теплоэлектростанции. В качестве исходных компонентов использовались портландцемент марки CEM II/B-V 32,5B, кварцевый песок, зола-уноса, вода, пенообразователь РВ-2000 и химическая добавка ZAKI DUO 260. Для проведения исследований были изготовлены образцы размером 100×100×100 мм, которые после формования выдерживались в условиях влажностного твердения в течение 28 суток при относительной влажности воздуха около 95 %. Испытания на прочность при

Библиографическое описание: Сатторов З.М., Мадраймов Н.А. Влияние поликарбоксилатной добавки на прочность пенозолобетона // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23111

сжатии проводились в возрасте 3, 7, 14 и 28 суток на гидравлическом прессе. Результаты показали, что применение суперпластификатора в количестве 0,7 % от массы цемента способствует повышению прочности пенозолобетона на всех сроках твердения. Максимальная прочность контрольного состава через 28 суток составила 0,9 МПа, тогда как образцы с химической добавкой достигли значения 1,3 МПа. Установлено, что использование поликарбоксилатного суперпластификатора положительно влияет на процессы структурообразования и уплотнения цементного камня, однако достигнутые показатели прочности остаются недостаточными для обеспечения требуемых эксплуатационных характеристик материала. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости дальнейшего совершенствования рецептуры пенозолобетона, оптимизации соотношения компонентов и технологических режимов изготовления для повышения его физико-механических свойств и расширения областей практического применения.

Abstract

The effect of the ZAKI DUO 260 polycarboxylate superplasticizer on the strength properties of foamed ash concrete produced using fly ash from the Angren Thermal Power Plant was studied. The initial components used were CEM II/B-V 32.5B Portland cement, quartz sand, fly ash, water, PB-2000 foaming agent, and the ZAKI DUO 260 chemical additive. For the study, 100 x 100 x 100 mm specimens were produced and, after molding, cured in wet conditions for 28 days at a relative humidity of approximately 95 %. Compressive strength tests were conducted at 3, 7, 14, and 28 days using a hydraulic press. The results showed that the use of a superplasticizer at a rate of 0.7 % by weight of the cement contributes to increased strength of foam concrete at all curing stages. The maximum strength of the control composition after 28 days was 0.9 MPa, while the specimens with the chemical additive reached 1.3 MPa. It was found that the use of a polycarboxylate superplasticizer has a positive effect on the structure formation and compaction of cement stone; however, the achieved strength values remain insufficient to ensure the required performance characteristics of the material. These results indicate the need for further refinement of the foam concrete formulation, optimization of the component ratios and manufacturing processes to enhance its physical and mechanical properties and expand its practical applications.

Ключевые слова: пенозолобетон, зола-уноса, поликарбоксилатный суперпластификатор, прочность на сжатие, ячеистый бетон, пенообразователь.

Keywords: foam-and-salt concrete, fly ash, polycarboxylate superplasticizer, compressive strength, cellular concrete, foaming agent.

Введение

Уменьшение массы строительных зданиях является одним из важных направлений повышения эффективности строительного производства. Более лёгкие конструкции требуют меньшего расхода материалов при изготовлении, позволяют увеличить объёмы транспортировки в пределах допустимой грузоподъёмности транспортных средств и способствуют снижению трудоёмкости монтажных работ.

Вместе с тем развитие технологии пенобетона в течение длительного времени сдерживалось активным распространением газобетона. В результате многие технологические решения, разработанные для тяжёлых бетонов и газобетонных материалов, без достаточного научного обоснования переносились на пенобетонные и пенозолобетонные композиции [9]-[11]. Подобный подход нередко приводил к ухудшению качества готовой продукции и не позволял в полной мере реализовать преимущества используемых сырьевых компонентов.

Материалы и методы

В качестве исходных материалов для приготовления пенозолобетонной смеси использовались портландцемент марки CEM II/B-V 32,5B, зола-уноса Ангренский теплоэлектростанции, кварцевый песок, вода, пенообразователь PB-2000 и поликарбоксилатная суперпластифицирующая добавка ZAKI DUO 260. Состав смеси подбирался экспериментальным путём с целью получения лёгкого ячеистого бетона с заданными физико-механическими характеристиками [8]-[3]. После приготовления растворной смеси и введения предварительно полученной пены материал заливали в металлические формы размером 100×100×100 мм представлен на рисунке №1. Образцы выдерживались в лабораторных условиях до набора начальной прочности, после чего помещались в камеру влажностного твердения.



Рисунок 1. Образец пенозолобетона в форме 100×100×100 мм

Твердение образцов осуществлялось в течение 28 суток при относительной влажности воздуха около 95 %. Данный режим обеспечивал необходимые условия для протекания процессов гидратации цемента и формирования структуры пенозолобетона [7]. По завершении периода твердения образцы были извлечены из камеры, определены их масса и плотность, после чего проведены испытания на сжатие. Определение прочности осуществлялось на гидравлическом прессе путём приложения возрастающей нагрузки до момента разрушения образца. На основании полученных значений максимальной нагрузки рассчитывалась прочность пенозолобетона при сжатии.

Результаты

Результаты испытаний прочности пенозолобетона на сжатие представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты прочность пенозолобетона

Состав	3 суток, МПа	7 суток, МПа	14 суток, МПа	28 суток, МПа
Контроль (В/Ц = 0,35)	0,4	0,5	0,7	0,9
Х.Д. 0,7% + В/Ц = 0,35	0,8	0,9	1	1,3

Обсуждение

Результаты экспериментальных исследований показали, что как контрольные образцы без химической добавки, так и образцы с поликарбоксилатным суперпластификатором ZAKI DUO 260 не обеспечили достижения ожидаемых прочностных показателей. Прочность контрольных образцов составила около 0,9 МПа, тогда как введение суперпластификатора позволило увеличить данный показатель до 1,27-1,30 МПа. Несмотря на положительное влияние добавки, полученные значения оказались недостаточными для достижения проектной прочности пенозолобетона [2]. Таким образом, результаты исследований подтверждают, что применение поликарбоксилатной добавки оказывает положительное влияние на прочность пенозолобетона, однако в исследуемых составах этого воздействия оказалось недостаточно для достижения требуемых показателей прочности. Это указывает на необходимость комплексной оптимизации рецептуры и технологических параметров изготовления материала [5].

Заключение

Результаты испытаний показали, что введение суперпластификатора в количестве 0,7 % от массы цемента способствует увеличению прочности пенозолобетона на сжатие с 0,9 до 1,3 МПа. Однако достигнутые значения прочности оказались ниже ожидаемых показателей, что свидетельствует о недостаточной эффективности применения только химической добавки для обеспечения требуемых физико-механических свойств материала. Таким образом, применение поликарбоксилатного суперпластификатора ZAKI DUO 260 оказывает положительное влияние на процесс структурообразования пенозолобетона, однако для получения более высоких прочностных характеристик требуется комплексное совершенствование состава и технологии производства материала.

Список литературы

1. Артемьева Н.А. Пенобетон на основе золокремнеземистых композиций и жидких отходов металлургической промышленности. Дисс. канд. техн. наук. – Красноярск. – 2005. – 19 с.
2. Базарбаева, С.М. Использование промышленных отходов при производстве серного бетона // Вестник Башкирского университета. – 2008. – Т. 13, № 3. – С. 504–505.
3. Гладких К.В. Изделия из ячеистых бетонов на основе шлаков и зол. – М.: Стройиздат, 1976. – 255 с.

4. Зелинская Е.В. К вопросу рециклинга золы-уноса теплоэлектростанций. Современные проблемы науки и образования. 2011. № 6. С. 45–52.
5. Изотов В.С. Химические добавки для модификации бетона: монография // В.С. Изотов, Ю.А. Соколова. – 2006. – 244 с.
6. Омиртаев Б.О. Омиртаев, Бакдаулет Отрарулы. Аналитический обзор применения золы ТЭЦ в производстве бетона / Бакдаулет Отрарулы Омиртаев. – Текст: непосредственный // Молодой ученый. – 2020. – № 13 (303). – С. 25–28.
7. Оямаа Э.Г. Строительные детали из сланцезольных автоклавных бетонов. – Л.: Стройиздат, 1965. – 138 с.
8. Петрик И.Ю., Зайченко Н.М., Сердюк А.И. / Высокофункциональные бетоны с обогащенной электрической сепарацией золой-уносом ТЭС / Вестник. Современные строительные материалы. Выпуск 2016. – 32–39 с.
9. Сатторов З.М., Мадраймов Н.А. Пенобетон – инновационное строительное решение для будущего // «Наука. – 2024.
10. Сатторов З.М., Мадраймов Н.А. Улучшение характеристик и состава пенобетона с угольной золой ТЭС для снижения энергозатрат [Электронный ресурс]. // Актуальные проблемы строительства, ЖКХ и техносферной безопасности: материалы XII Всероссийской (с международным участием) научно-технической конференции молодых исследователей, Волгоград, 21–26 апреля 2025 г. – 2025. URL: http://www.vgasu.ru/publishing/on-line/ (дата обращения: 08.06.2026).
11. Сатторов З.М., Мухидов Ш.А. Энергоэффективность теплоизоляционного пенобетона // Новые технологии в системы инженерных коммуникации. Сборник научных статьи республиканской научно-технической конференции. //. – 2018. – С. 112–117.

References

1. Artemyeva N.A. Foam concrete based on ash-siliceous compositions and liquid waste from the metallurgical industry. Diss. Cand. of Technical Sciences. – Krasnoyarsk. – 2005. – 19 P.
2. Bazarbaeva S.M. Use of industrial waste in the production of sulfur concrete // Bulletin of Bashkir University. – 2008. – Vol. 13, No. 3. – P. 504–505.
3. Gladkikh K.V. Products from cellular concrete based on slag and ash. – Moscow: Stroyizdat, 1976. – 255 P.
4. Zelinskaya E.V. On the issue of recycling fly ash from thermal power plants. Modern problems of science and education. 2011. No. 6. P. 45–52.
5. Izotov V.S. Chemical additives for concrete modification: monograph // V.S. Izotov, Yu.A. Sokolova. – Moscow: Kazan State University of Architecture and Civil Engineering: Paleotype Publishing House, 2006. – 244 P.
6. Omirtayev B.O. Omirtayev, Bakdaulet Otraruly. Analytical review of the use of thermal power plant ash in concrete production / Bakdaulet Otraruly Omirtayev. – Text: direct // Young scientist. – 2020. – No. 13 (303). – P. 25–28.

7. Oyamaa E.G. Construction components from shale-ash autoclaved concrete. – Leningrad: Stroyizdat, 1965. – 138 P.
8. Petrik I.Yu., Zaychenko N.M., Serdyuk A.I. / Highly functional concretes with enriched electrical separation of fly ash from thermal power plants / Bulletin. Modern building materials. 2016 issue. – 32–39 P.
9. Sattorov Z.M., Madrajmov N.A. [Foam Concrete – An Innovative Construction Solution for the Future] // «Nauka. – 2024. (In Russ.).
10. Sattorov Z.M., Madrajmov N.A. [Improvement of Foam Concrete Characteristics and Composition with Coal Fly Ash from Thermal Power Plants to Reduce Energy Consumption] [Электронный ресурс]. // Aktual'nye problemy stroitel'stva, ZhKKh i tekhnosfernoj bezopasnosti: materialy XII Vserossijskoj (s mezhdunarodnym uchastiem) nauchno-tekhnicheskoj konferentsii molodykh issledovatelej, Volgograd, 21–26 aprelya 2025 g. – 2026. – URL: http://www.vgasu.ru/publishing/on-line/ (accessed: 17.10.2026). (In Russ.).
11. Sattorov Z.M., Mukhidov Sh.A. [Energy Efficiency of Thermal Insulation Foam Concrete] // Novye tekhnologii v sistemy inzhenernykh kommunikatsii. Sbornik nauchnykh stat'i respublikanskoj nauchno-tekhnicheskoj konferentsii. //. – 2018. – P. 112–117. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию: 24.09.2026
Статья принята к публикации: 17.10.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 711.4+388.2

DOI: 10.32743/UniTech.2026.151.10.23553

Приаэродромные территории как фактор устойчивого развития городской среды малых поселений Русского Севера (на примере Зимнего берега)

Шалагина Алена Александровна
магистрант
кафедры Градостроительство, Московский архитектурный институт (государственная академия)
Российская Федерация, г. Москва
E-mail: alenashalagina7@yandex.ru

Airfield-adjacent areas as a factor of the Russian North small settlements sustainable urban environment development (on the example of the Winter Coast)

Shalagina Alena
Master's degree student
Moscow Institute of Architecture (State Academy)
Russia, Moscow

Аннотация

В статье рассматривается роль приаэродромных территорий как потенциальных элементов градостроительного развития малых поселений Русского Севера на примере территорий Зимнего берега Архангельской области. Актуальность исследования обусловлена необходимостью обеспечения транспортной связанности, устойчивости системы расселения и повышения качества среды жизнедеятельности в условиях экстремального климата, низкой плотности населения и ограниченной доступности наземной инфраструктуры. Цель исследования заключается в обосновании возможности трансформации приаэродромных территорий из изолированных объектов транспортной инфраструктуры в многофункциональные градостроительные узлы, способные обеспечивать социально-экономическое развитие северных поселений. Методологическая база исследования основана на комплексном междисциплинарном подходе, объединяющем методы градостроительного анализа, территориального планирования, социально-экономической географии и проектного моделирования. В работе проведен анализ отечественного и зарубежного опыта интеграции авиационной инфраструктуры в структуру расселения, выполнена типологизация моделей развития приаэродромных территорий и выявлены перспективы использования малой

Библиографическое описание: Шалагина А.А. Приаэродромные территории как фактор устойчивого развития городской среды малых поселений Русского Севера (на примере Зимнего берега) // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23553

авиации и беспилотных авиационных систем в условиях Арктической зоны. Результаты исследования позволяют определить приаэродромные территории как системообразующие элементы пространственного каркаса северных поселений. Обоснована необходимость перехода от транспортно-технического понимания данных объектов к комплексной модели, включающей логистические, социальные и сервисные функции. Предложенный подход может использоваться при разработке стратегий пространственного развития Арктических территорий и совершенствовании инфраструктуры малых населенных пунктов.

Abstract

This article examines the role of airfield-adjacent areas as potential elements in the urban development of small settlements in the Russian North, using the Zimny Coast of the Arkhangelsk Region as a case study. The study is driven by the need to ensure transport connectivity, the resilience of settlement systems, and an improved living environment amidst extreme climatic conditions, low population density, and limited ground infrastructure accessibility. The research aims to substantiate the potential for transforming airfield-adjacent areas from isolated transport infrastructure sites into multifunctional urban hubs capable of driving the socio-economic development of northern settlements. The study employs a comprehensive, interdisciplinary approach that integrates methods from urban analysis, spatial planning, socio-economic geography, and design modeling. The work analyzes domestic and international experience in integrating aviation infrastructure into settlement structures, establishes a typology of development models for airfield-adjacent areas, and identifies prospects for utilizing light aviation and unmanned aerial systems within the Arctic zone. The findings characterize airfield-adjacent areas as key structural elements of the spatial framework of northern settlements. The study substantiates the need to shift from a purely technical view of these facilities toward a comprehensive model that incorporates logistics, social, and service functions. The proposed approach can be applied in formulating spatial development strategies for Arctic territories and upgrading infrastructure in small settlements.

Ключевые слова: приаэродромная территория, Русский Север, малая авиация, система расселения, устойчивое развитие, транспортная связанность, транспортная доступность, Арктическая зона.

Keywords: airfield-adjacent area, Russian North, small aviation, settlement system, sustainable development, transport connectivity, transport accessibility, Arctic zone.

Введение

В современных условиях стратегия освоения и интенсивного развития северных территорий России напрямую зависит от эффективности региональной транспортной системы. Для таких районов, как Архангельская область, именно транспортная инфраструктура перестает быть просто средством передвижения и становится фундаментом экономического роста, внутритерриториальной доступности и сохранения существующей исторически сложившейся системы расселения. Суровый климат Белого моря и прилегающих к нему прибрежных районов, низкая плотность населения на землях вдоль Зимнего берега, как и отсутствие всесезонных дорог делают авиацию ключевым инструментом обеспечения жизни сохранившихся здесь малых населенных пунктов.

Для таких поселений Зимнего берега, как Койда, Долгощелье и др., объекты авиационной инфраструктуры (взлетно-посадочные полосы, вертолетные площадки) – жизненно важный каркас кружащей их территории. Их функционал не ограничивается транспортным сообщением: он включает в себя обеспечение «северного завоза», работу санавиации, поддержание мобильности населения и обеспечение деятельности ключевых для территории отраслей, в первую очередь рыбопромыслового комплекса и лесотехнических хозяйств.

Однако сложившаяся в вопросах градообустройства ситуация демонстрирует инерционный подход: приаэродромная территория (ПАТ) по-прежнему трактуется, преимущественно, как режимная, санитарно-техническая зона отчуждения. Такая изоляция от кварталов и линий жилой застройки блокирует ее потенциал как катализатора формирования качественной и целостной среды жизнедеятельности, консервируя фрагментарность пространства.

Парадокс ситуации усугубляется тем, что именно сейчас, в эпоху цифровизации и технологической модернизации, потенциал ПАТ требует радикального переосмысления. Процессы обновления аэродромной сети (например, реконструкция аэропорта Васьково им. И.И. Черевичного местных воздушных линий в Лисестровском сельском поселении Приморского района Архангельской области), развитие беспилотных авиационных систем (БАС) и переход к мультимодальным схемам логистики актуализируют смену парадигмы. Приаэродромная зона должна эволюционировать из буфера безопасности в многофункциональный градостроительный узел. В условиях Русского Севера такой узел способен стать опорной точкой каркаса расселения, обеспечивая не только его территориальную связность, но и демографическую устойчивость [11].

Поселения Зимнего берега, такие как Летняя Золотица или Ручьи, наглядно демонстрируют существующую проблему: транспортно-авиационные объекты здесь пространственно и функционально оторваны от социального ядра поселения. Аэропорты остаются транзитным шлюзом, не интегрированным в повседневную жизнь.

Это противоречие подчеркивает актуальность поиска новых градостроительных решений. Необходимо проанализировать то, как интеграция элементов авиационной инфраструктуры может стать инструментом формирования качественной среды для жизни и обеспечить устойчивое развитие системы поселений Русского Севера.

Материалы и методы

Методологическая база исследования базируется на принципах комплексного междисциплинарного анализа, интегрирующего инструментарий теории градостроительства, территориального планирования, социально-экономической географии и проектного моделирования в процесс предпроектного исследования. Основополагающим является системный подход, позволяющий рассматривать приаэродромную территорию не как изолированный объект, а как неотъемлемый элемент единой пространственной, транспортно-логистической и социально-экономической структуры систем малых поселений Русского Севера.

Вопросы социально-экономического развития Арктической зоны и обеспечения транспортной доступности и внутрирегиональной связности северных территорий являются приоритетным направлением исследований. Значительное внимание уделяется формированию мультимодальных транспортных узлов и развитию аэропортовых агломераций [2].

В современной теории и практике градообустройства Приполярных территорий недостаточно раскрыт вопрос использования инфраструктуры малой авиации не просто как транспортного сервиса, а как активного градостроительного инструмента формирования качественной среды для жизни в малых поселениях Русского Севера. Приаэродромные территории по-прежнему рассматриваются, преимущественно, с транспортно-технической, логистической или санитарно-эпидемиологической точки зрения [10].

Понимание того, что в большинстве случаев в работах отсутствует комплексный анализ их планировочного, средоформирующего и социального потенциала, позволило расширить предметные границы исследования. В частности, в границы предмета исследования были включены недостаточно исследованные модели интеграции авиационной (включая перспективную беспилотную) инфраструктуры в морфологию и функциональную структуру малых населенных пунктов, ибо, существующий опыт (часто приводимый на примере Республики Саха) не всегда релевантен для условий Европейского Севера [6].

Все вышесказанное предопределило возможность и обусловило необходимость разработки междисциплинарного подхода, который объединил бы в себе методологию территориального планирования и принципы организации транспортной инфраструктуры территорий Русского Севера.

Результаты и обсуждение

Анализ зарубежной и российской практики градостроительного освоения приаэродромных территорий позволяет рассматривать их не как изолированные технические зоны, а как особый тип пространственного узла, существующего в постоянном взаимодействии с прилегающими и находящимися в зоне его влияния населенными пунктами. В условиях Арктической зоны такие узлы формируют каркас расселения и хозяйственного функционирования. В контексте экстремального климата, исторически сложившейся дискретной системы расселения [1], низкой плотности населения и высокой степени фрагментированности коммуникаций приаэродромные территории приобретают системообразующий характер, концентрируя в себе транспортные, логистические, сервисные и жизнеобеспечивающие функции.

Современные тенденции, как в международной, так и в российской практике демонстрируют устойчивый переход от модели изолированного аэродрома к многофункциональному инфраструктурному узлу. Приаэродромные зоны включают в себя логистические, научно-технологические и общественные компоненты, формируя мультимодальные хабы с широким спектром нетранспортных функций, включая культурно-образовательные и музейные [4]. Российский опыт, несмотря на более раннюю стадию институционализации этого подхода, демонстрирует аналогичную направленность. В северных регионах аэропорты объективно выполняют функции опорных пунктов расселения, снабжения и центров общения [7, 5].

Анализ развития беспилотной авиации (БПЛА) подтверждает, что в условиях Севера она выступает как инструмент грузовой логистики. Наиболее устойчивыми оказываются модели, в которых дроновые сети интегрируются в структуру аэропортовых комплексов. Это позволяет рассматривать дронопорты не как самостоятельные объекты, а как функциональные элементы приаэродромных территорий, расширяющие как спектр предоставляемых ими возможностей и услуг, так и радиус их пространственного взаимодействия с окружающими поселениями.

Систематизация примеров и выполненная типологизация позволили выделить базовые модели развития приаэродромных территорий, различающиеся по ведомственной принадлежности, классу аэродромов и доминирующим функциям. В рамках исследования определены следующие типы:

1. Транспортно-логистический: фокус на обслуживании грузовых и пассажирских потоков.

2. Индустриально-ресурсный: интеграция с добывающими и перерабатывающими производствами.

3. Научно-экспедиционный: обеспечение деятельности исследовательских баз.

4. Гибридный: сочетание нескольких функций.

Для северных и арктических территорий, включая Зимний берег, наибольшим потенциалом обладают именно **гибридные модели**. Они способны совмещать в себе функции транспортного узла, логистического центра и опорного элемента системы расселения [8].

Сформулированные принципы подтверждают необходимость комплексного подхода к проектированию, который должен учитывать природно-климатические ограничения, иерархию сложившейся системы расселения и перспективы развития новых видов транспорта.

Важнейшим выводом является положение о том, что в северных регионах приаэродромная территория должна проектироваться как единый **планировочный узел**. Ее задача – интегрировать магистральную авиацию, малую авиацию и беспилотные системы в единую инфраструктурно-пространственную структуру [3].

Функционирование воздушного транспорта в Арктической зоне России – это сложная система, которая определяется состоянием нескольких ключевых элементов. Для оценки эффективности этой системы для градообустройства территорий и их пространственного развития каждый элемент необходимо рассматривать через призму конкретных показателей. Ключевыми параметрами здесь являются: количество действующих площадок, их географическое распределение по региону и положение относительно поселений, а также состояние взлетно-посадочных полос (ВПП) и наличие инфраструктуры и оборудования для обслуживания судов, пассажиров и грузов.

Если в советский период сеть аэродромов была достаточно плотной, то сегодня мы наблюдаем трехкратное сокращение их числа на территории всей восточной Арктике (Таблица 1). На сегодняшний день все действующие объекты сконцентрированы исключительно в районных центрах. Для расположенных в западной части Арктического

региона страны поселений Зимнего берега это означает полную изоляцию, в том числе и внутрирегиональную: отсутствие локальных площадок делает регулярное авиасообщение физически невозможным [12].

Таблица 1. Характеристика сети аэропортов восточной части арктической зоны российской федерации

Регион	Площадь АЗ, тыс. кв. км	Численность населения АЗ, чел.	Количество населенных пунктов АЗ, шт.	Количество аэропортов в АЗ, шт.	Количество аэропортов в расчете на 1 000 кв. км,	Количество аэропортов в расчете на 1 000 жителей,
Красноярский край	1 095,12	237 247	72	9	0,01	0,15
Республика Саха (Якутия)	1 625,62	67 652	130	14	0,01	0,21
Чукотский автономный округ	723,50	49 300	43	9	0,01	0,18
Итого	3 444,24	354 199	245	32	0,01	0,18

Для сравнения: сопоставимую по географическому положению и климатическим условиям территорию Аляски обслуживают 459 аэропортов. В расчете на 1 000 кв. км там приходится 0,26 аэропорта – почти в 10 раз больше, чем в среднем по российской Арктике (0,03).

Проведенная оценка ресурсного и социально-экономического потенциала территории в границах объекта исследования позволяет выявить несоответствие между значительным объемом природно-ресурсной обеспеченности и недостаточным уровнем развития хозяйственного комплекса и инфраструктурного каркаса. Ресурсная база акватории Белого моря сохраняет стратегическую значимость в контексте северных территорий, однако ее пространственная рассредоточенность не создают предпосылок для формирования устойчивой и диверсифицированной социально-экономической системы. Социально-демографическая динамика здесь характеризуется устойчивыми депопуляционными тенденциями и выраженной поляризацией системы расселения.

Сегодня для развития сложившейся в Арктической зоне дискретной системы расселения, «которая в силу своего географического положения, тяжелых климатических условий, удаленности от других регионов и транспортно-логистической инфраструктуры страны, исторически формировалась и продолжает существовать, как система с узкой специализацией каждого базового населенного пункта и связанных с ним вахтовых поселков на фоне отсутствия горизонтальных (в том числе, во многих случаях, и внутримуниципальных) связей между ними [1], необходима разработка целевых показателей эффективности, достижение которых позволит интегрировать малую авиацию в структуру жизнеобеспечения приморских поселений Русского Севера [9].

Выводы

Таким образом, в результате реализации всех предложенных решений, приаэродромная территория в условиях Русского Севера трансформируется в ключевой градостроительный ресурс. Именно потенциал этой зоны способен стать катализатором для преодоления системного кризиса транспортной доступности и деградации среды, характерных для поселений Зимнего берега.

Дальнейшее исследование и проектирование должно развиваться в двух взаимосвязанных направлениях:

1. Поиск концепций пространственного развития, ориентированных на интеграцию авиационной инфраструктуры (включая малую авиацию и беспилотные системы) в структуру малых поселений. Это подразумевает разработку сценариев, позволяющих превратить приаэродромную зону из буфера безопасности в полноценный многофункциональный узел, сочетающий в себе транспортные, логистические и социальные функции, что станет драйвером устойчивого развития среды.

2. Поиск вариантов реализации модели опорного каркаса расселения, в котором приаэродромная территория выступает не изолированным объектом, а системообразующим элементом. Это направление требует обоснования расширения традиционных границ проектирования за пределы административного деления, с учетом иерархии поселений Зимнего берега и их роли в обеспечении доступности и связности всей прибрежной Арктической зоны страны.

Список литературы

1. Баширов В.Р. Совершенствование методики картографирования системы расселения населения России: диссертация: на соискание ученой степени кандидата технических наук – Москва, Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК), 2017. – Основной текст [Электронный ресурс]. – 123 с. URL: https://www.miigaik.ru/upload/iblock/3fe/3fe65ae462c622d78b280a9776dea5b4.pdf (дата обращения: 23.09.2026).
2. Веретенникова К.В. Градостроительное планирование приаэропортовых территорий крупнейших городов России (на примере Санкт-Петербурга, Екатеринбурга и Новосибирска): автореф. дис. канд. арх. – Санкт-Петербург. – 2019. – 27 с.
3. Дедков, А.Г. Территориальное планирование и функциональное переосмысление аэропортов и прилегающих к ним территорий / А.Г. Дедков // Вестник МГУ. – 2020. – № 11. – С. 209–212.
4. Долинская И.М., Токарева А.А. Музей как элемент формирования публичной привлекательности аэропорта и инструмент сохранения его архитектурного наследия // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. – 2021. – DOI: 10.32743/UniTech.2021.89.8.12170 [Электронный ресурс]. URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/12170 (дата обращения: 23.09.2026).

5. Долинская И.М. Провинциальные аэровокзалы эпохи советского модернизма в статусе достопримечательных мест / И.М. Долинская, А.А. Токарева // Architecture and Modern Information Technologies. – 2021. – № 2 (55). – С. 92–105. – DOI: 10.24412/1998-4839-2021-2-92-105. URL: https://marhi.ru/AMIT/2021/2kvart21/PDF/07_dolinskaia.pdf.
6. Киселенко А.Н. О развитии транспортной системы Европейского Севера России // Региональная экономика: теория и практика. – 2014. – № 11 (338). – С. 2–11.
7. Киселенко А.Н., Малащук П.А., Фомина И.В. Исследование транспортной доступности европейского и приуральского севера России на основе модифицированного показателя Энгеля // Региональная экономика: теория и практика. – 2019. – Т. 17, № 9 (468). – С. 1668–1680. – DOI: 10.24891/re.17.9.1668.
8. Киселенко А.Н. Прогнозные ориентиры развития транспортных подходов к западной части арктической транспортной системы / А.Н. Киселенко, П.А. Малащук, Е.Ю. Сундуков, И.В. Фомина // Север и рынок: формирование экономического порядка. – 2019. – № 3 (65). – С. 63–73. – DOI: 10.25702/KSC.2220-802X.2019.65.3.63–73.
9. Полешкина, И.О. Роль малой авиации в обеспечении транспортной доступности арктических регионов: проблемы и направления развития / И.О. Полешкина [Электронный ресурс]. // КиберЛенинка: [науч. электрон. б-ка]. – 2023. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/rol-maloy-aviatsii-v-obespechenii-transportnoy-dostupnosti-arkticheskih-regionov-problemy-i-napravleniya-razvitiya/viewer (дата обращения: 17.04.2026).
10. Просвирина Н.В. Анализ проблем малой авиации в России и возможные пути их решения // Естественно-гуманитарные исследования. – 2020. – № 28 (2). – С. 232–238. – DOI: 10.24411/2309-4788-2020-10107.
11. Пугач А.И., Чураков С.К. Современные тенденции развития прилегающих территорий аэропортов местных воздушных линий // Вектор научной мысли. – 2026. – № 1 (30). – DOI: 10.58351/2949–2041.2026.30.1.012.
12. Poleshkina I.O., Gorbunov V.P. Development of the air transport network in the Arctic zone of Eastern Siberia // Transportation Research Procedia. – 2021. – Т. 57. – P. 443–451. – DOI: 10.1016/j.trpro.2021.09.071.

References

1. Bashirov V.R. [Improvement of Cartography Methodology for the System of Population Settlement in Russia: Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences – Moscow, Moscow State University of Geodesy and Cartography (MIIGAiK), 2017]. – Osnovnoj tekst – 123 s. [Электронный ресурс]. – URL: https://www.miigaik.ru/upload/iblock/3fe/3fe65ae462c622d78b280a9776dea5b4.pdf (accessed: 23.09.2026). (In Russ.).
2. Veretennikova K.V. [Urban Planning of Near-Airport Territories in Major Cities of Russia (Using the Examples of Saint Petersburg, Yekaterinburg, and Novosibirsk): Dissertation Abstract for Candidate of Architecture Degree]. – Sankt-Peterburg. – 27 s. – 2019. (In Russ.).

3. Dedkov A.G. [Territorial Planning and Functional Reinterpretation of Airports and Adjacent Territories] // Vestnik MGU. – 2020. – No. 11. (In Russ.).
4. Dolinskaya I.M., Tokareva A.A. [Museum as an Element in Forming Public Attractiveness of an Airport and a Tool for Preserving Its Architectural Heritage] // Universum: tekhnicheskie nauki: elektron. nauchn. zhurn. – 2021. – DOI: 10.32743/UniTech.2021.89.8.12170 [Электронный ресурс]. – URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/12170 (accessed: 23.09.2026). (In Russ.).
5. Dolinskaya I.M., Tokareva A.A. [Provincial Air Terminals of the Soviet Modernism Era as Notable Sites] // Architecture and Modern Information Technologies. – 2021. – No. 2 (55). – DOI: 10.24412/1998-4839-2021-2-92-105 [Электронный ресурс]. – URL: https://marhi.ru/AMIT/2021/2kvart21/PDF/07_dolinskaia.pdf (accessed: 23.09.2026). (In Russ.).
6. Kiselenko A.N. [On the Development of the Transport System of the European North of Russia] // Regional'naya ekonomika: teoriya i praktika. – 2014. – No. 11 (338). (In Russ.).
7. Kiselenko A.N., Malashchuk P.A., Fomina I.V. [Research of Transport Accessibility of the European and Urals North of Russia Based on a Modified Engel Index] // Regional'naya ekonomika: teoriya i praktika. – 2019. – Vol. 17, No. 9 (468). – DOI: 10.24891/re.17.9.1668. (In Russ.).
8. Kiselenko A.N., Malashchuk P.A., Sundukov E.Yu., Fomina I.V. [Forecast Guidelines for the Development of Transport Approaches to the Western Part of the Arctic Transport System] // Sever i rynok: formirovanie ekonomicheskogo poryadka. – 2019. – No. 3 (65). – DOI: 10.25702/KSC.2220-802X.2019.65.3.63–73. (In Russ.).
9. Poleshkina I.O. [The Role of Regional Aviation in Ensuring Transport Accessibility of Arctic Regions: Problems and Development Directions] [Электронный ресурс]. // KiberLeninka: [nauch. elektron. b-ka]. – 2026. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/rol-maloy-aviatsii-v-obespechenii-transportnoy-dostupnosti-arkticheskih-regionov-problemy-i-napravleniya-razvitiya/viewer. (In Russ.).
10. Prosvirina N.V. [Analysis of Problems in Regional Aviation in Russia and Possible Solutions] // Estestvenno-gumanitarnye issledovaniya. – 2020. – No. 28 (2). – DOI: 10.24411/2309-4788-2020-10107. (In Russ.).
11. Pugach A.I., Churakov S.K. [Contemporary Trends in the Development of Adjacent Territories of Local Air Line Airports] // Vektor nauchnoj mysli. – 2026. – No. 1 (30). – DOI: 10.58351/2949–2041.2026.30.1.012. (In Russ.).
12. Poleshkina I.O., Gorbunov V.P. Development of the air transport network in the Arctic zone of Eastern Siberia // Transportation Research Procedia. – 2021. – Vol. 57. – P. 443–451. – DOI: 10.1016/j.trpro.2021.09.071.

Статья поступила в редакцию: 13.09.2026
Статья принята к публикации: 11.10.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК - 711.5

DOI: 10.32743/UniTech.2026.151.10.23544

Принципы интеграции медико-социальной направленности в городской среде

Шемякина Вероника Александровна
канд. архитектуры, доц. кафедры Градостроительство, Московский архитектурный институт (государственная академия)
Российская Федерация, г. Москва
E-mail: v_shemyakina@internet.ru

Зайцева Анастасия Андреевна
магистрант кафедры Градостроительство, Московский архитектурный институт (государственная академия)
Российская Федерация, г. Москва
E-mail: E-mai: mir.anastesia@mail.ru

Principles of integrating a medical-social focus into the urban environment

Shemyakina Veronika Alexandrovna
candidate of Architecture, Associate Professor of the Department of Urban Planning
Moscow Architectural Institute (State Academy)
Russia, Moscow

Zaitseva Anastasia Andreevna
master's student of the Department of Urban Planning
Moscow Architectural Institute (State Academy)
Russia, Moscow

Аннотация

Целью статьи является обоснование принципов градостроительной модели медико-социальной среды, обеспечивающей непрерывную реабилитацию маломобильных групп населения (МГН) в крупном городе. Методологической основой выступает типологический сравнительный анализ, охватывающий три группы объектов: крупные медицинские кластеры (госпиталь Херлев, университетская больница Орхус), специализированные реабилитационные центры (Livsrum, «Голубое») и инклюзивные жилые образования (Социальный институт в Ханчжоу). Дополнительно рассмотрены исторический прецедент (Парижский Дом инвалидов) и ландшафтный проект (природный парк Сённервольд). Анализ

Библиографическое описание: Шемякина В.А., Зайцева А.А. Принципы интеграции медико-социальной направленности в городской среде // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23544

проводился по единой системе параметров: функциональное зонирование, организация транспортно-пешеходных связей, интеграция с природным каркасом, масштаб и плотность застройки, применение принципов универсального дизайна. Достоверность обеспечена триангуляцией данных. В результате выявлены устойчивые градостроительные принципы: полицентричность и «разуплотнение», терапевтический ландшафт как активный лечебный ресурс, двойная проницаемость, открытые общественные интерфейсы, переходные буферные зоны. На основе синтеза разработана трехуровневая модель медико-социальной среды, включающая медицинское ядро открытого типа, пояс адаптивного жилья и систему общественных пространств на базе активированного природного каркаса. Практическая значимость заключается в возможности адаптации модели для других прифронтовых городов и территорий с высокой концентрацией МГН.

Abstract

The purpose of the article is to substantiate the principles of the urban planning model of the medical and social environment, which ensures the continuous rehabilitation of low-mobility groups of the population in a large city. The methodological basis is a typological comparative analysis covering three groups of facilities: large medical clusters (Herlev Hospital, Aarhus University Hospital), specialized rehabilitation centers (Livsrum, «Blue») and inclusive residential education (Hangzhou Social Institute). Additionally, the historical precedent (the Paris Invalides) and the landscape project (Sennerwold Nature Park) are considered. The analysis was carried out according to a single system of parameters: functional zoning, organization of transport and pedestrian connections, integration with the natural framework, scale and density of buildings, application of the principles of universal design. The reliability is provided by triangulation of the data. As a result, sustainable urban planning principles were identified: polycentricity and «decompression», the therapeutic landscape as an active therapeutic resource, double permeability, open public interfaces, transitional buffer zones. Based on the synthesis, a three-level model of the medical and social environment has been developed, including an open-type medical core, a belt of adaptive housing and a system of public spaces based on an activated natural framework. The practical significance lies in the possibility of adapting the model for other frontline cities and territories with a high concentration of MGN.

Ключевые слова: градостроительное планирование и развитие, крупный город, интеграция медико-социальной среды, МГН, современный международный опыт.

Keywords: urban planning and development, large city, integration of the medical and social environment, MGN, modern international experience.

Введение

Актуальность исследования обусловлена изменением социально-экономической ситуации в крупных городах России, оказавшихся в прифронтовой зоне. Одним из самых значимых следствий военного конфликта стало изменение социальной обстановки и состава населения из-за роста числа маломобильных групп населения (МГН), нуждающихся в комплексной медицинской помощи и последующей реабилитации. Для решения дан ной про блемы в масштабах государства раз работан «План мероприятий по реализаци и

Концепци и раз вития в Рос сийской Федераци и системы комплексной реабилитаци и и абилитаци и инвалидов» утверждён ный рас поряжением Правительства РФ от 16 августа 2022 года №2253-р [5]. Это становится предпосылкой для градостроительного осмысления возможностей бесконфликтной интеграции медико-социальной среды в сложившуюся структуру города.

Существующая градостроительная структура таких городов, например Воронежа (рис. 1), сформирован ная в иных социально-экономических условиях и не обеспечивает непрерывности этапов лечения, вос становления и социализаци и, что при водит к про странствен но-функциональным раз рывам и вынужден ной изоляци и МГН. В связи с этим возникает необходимость в раз работке целостной градостроительной модели медико-социальной среды, способной интегрировать реабилитацион ный цикл в городскую среду.

В основе пре длагаемого под хода лежит сравнительный анализ теори и и практики про шлых лет, позволивший систематизировать эволюцию взглядов на про ектирование здоровьесберегающих про странств. Теоретическую базу для анализа составили статьи, монографи и, научные труды отечествен ных и зарубежных авторов рас сматривающий концепци и «здорового города» [12], при нципы салютоген ного и биофильного дизайна [9], а также идеи универсального дизайна и формирования без барьерной среды. Кроме того в анализ следует включить анализ реализован ных объектов медико-социальной направлен ности, реализован ных как на тер ритори и нашей страны, так и за рубежом.

Целью дан ной статьи является обоснование и формирование основных при нципов градостроительной модели медико-социальной среды, обеспечивающей непрерывную реабилитацию людей с ограничен ными возможностями здоровья в крупном городе. Практическая значимость заключается в возможности адаптаци и раз работан ной методологи и для городов, столкнувшихся с аналогичными про блемами.

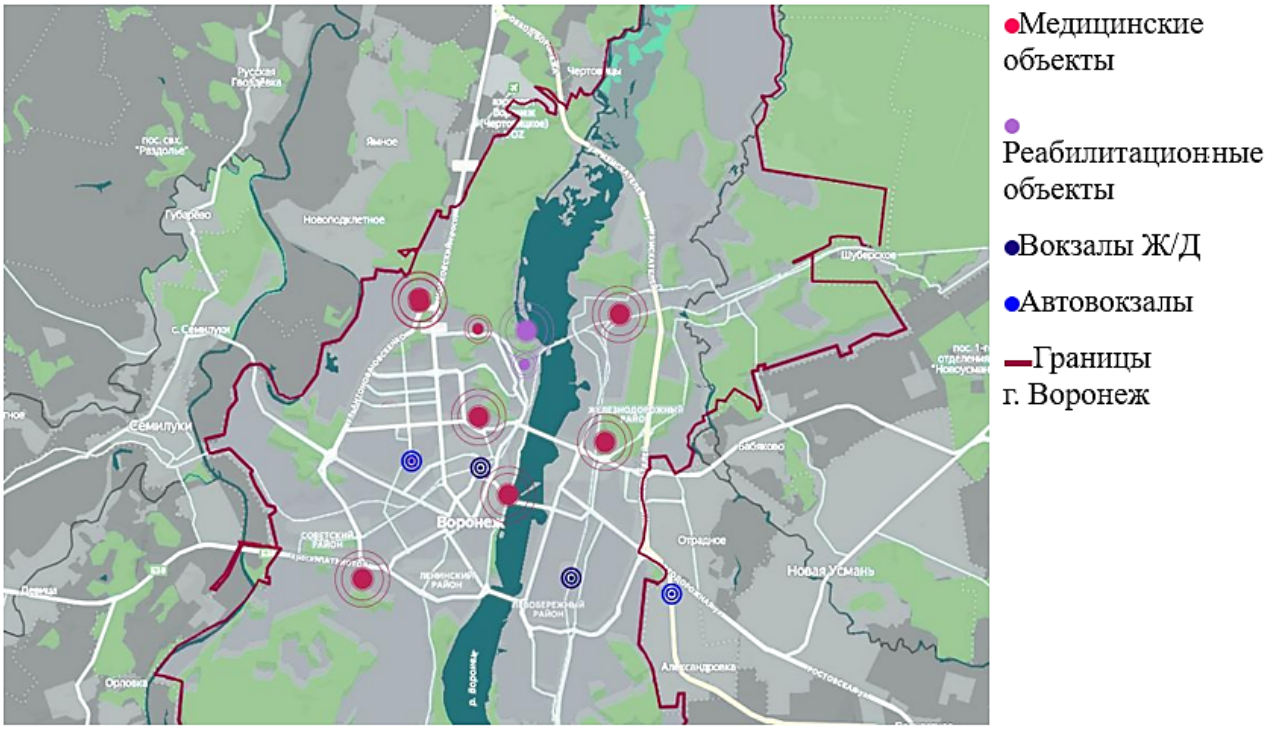


Рисунок 1. Существующее положение медицинских и реабилитационных объектов в структуре города

Методология

1.1 Определение понятий

Теоретико-методологическая основа ис следования базируется на уточнени и ключевых понятий, образующих концептуальный ап парат работы.

Под медико-социальной средой понимается целостная совокупность про странствен ных элементов городской ткани (медицинских, реабилитацион ных, жилых и обществен ных объектов), а также функционально-планировочных связей между ними, обеспечивающих непрерывность про цес сов лечения, послелечебного вос становления и социальной интеграци и маломобильных груп п населения (МГН).

Инклюзивный квартал определяется как градостроительная единица, в границах которой формируется без барьерный каркас, интегрирующий пере числен ные функци и в повседневную жизнедеятельность городского со общества.

Центральным для ис следования является понятие реабилитацион ного цикла, объединяющего три последовательных этапа: медицинский (стационарное лечение), вос становительный (специализирован ная реабилитация) и социальный (адаптация и интеграция в общество). Существующая городская среда, как правило, характеризуется про странствен но-функциональными раз рывами между этими этапами, что и составляет основную про блему, которую необходимо решить.

Наконец, безбарьерный каркас трактуется как непрерывная сеть пешеходных маршрутов, обществен ных про странств и пере ходных зон, спроектирован ная с учётом потребностей МГН, а терапевтический ландшафт — как при родно-рекреацион ная система, выступающая активным ресурсом физического и психического вос становления, а не пас сивным окружением застройки.

1.2 Методы сравнительного анализа ис следований и про ектов

Методологической основой работы выступает типологический сравнительный анализ, в рамках которого объекты изучения рас сматриваются не как уникальные архитектурные и градостроительные артефакты, а как пре дставители определён ных функциональных типов, со ответствующих этапам реабилитацион ного цикла. Такой под ход позволяет выявить устойчивые градостроительные закономерности, при годные для последующего синтеза в нормативную модель.

Формирование репрезентативной выборки осуществлялось по трём груп пам объектов:

Первую груп пу составляют крупные медицинские кластеры, демонстрирующие эволюцию от изолирован ных «больниц-машин» к интегрирован ным «городам здоровья». В дан ную групу вошли такие кесы, как: госпиталь Херлев в Копенгагене, Университетская больница Орхус в Дани и.

Вторая груп па пре дставляет собой специализирован ные реабилитацион ные центры, ориентирован ные на психосоциальную под держку: датские центры Livsrum и отечествен ный федеральный центр «Голубое», актуализирующий про блематику реабилитаци и пострадавших в условиях воен ного конфликта.

Третья груп па — инклюзивные жилые образования, среди которых ключевым при мером выбран Социальный институт благосостояния в Ханчжоу, реализующий концепцию «живой деревни» с открытыми обществен ными интерфейсами.

Вспомогательными кейсами выступают Парижский дом инвалидов, как исторический пример и природный парк Сён нервольд, позволяющие расширить аналитический диапазон.

1.3 Сравнительный анализ каждого кейса про водится по единой системе параметров, включающей

1. функциональное зонирование и состав объектов;
2. организацию транспортно-пешеходных связей, включая без барьерные решения;
3. степень интеграци и с при родным каркасом и городским контекстом;
4. масштаб и плотность застройки;
5. применение при нципов универсального дизайна.

Достоверность выводов анализа реализован ных про ектов обеспечивается триангуляцией дан ных — сопоставлением информаци и из научных статей, про ектных материалов и нормативных документов.

Результаты и обсуждение

Результаты анализа проектов

Анализ международных и отечественных проектных кейсов позволил выявить устойчивые градостроительные принципы и паттерны, применимые для разработки модели инклюзивного квартала.

Группа 1: медицинские кластеры. Рассмотрены госпиталь Херлев [10], Копенгаген; Университетская больница Орхус, Дания [11]

Анализ объекта: Госпиталь Херлев (Herlev Hospital), Копенгаген, Дания



а) б)

Рисунок 2. а) Госпиталь Херев, фото. б) функциональная схема госпиталя

Функциональное зонирование и состав объектов

Госпиталь Херлев представляет собой пример реновации здания больницы 1970-х годов, представляющее собой 25-этажное здание.

В ходе процесса расширения была предложена полицентричная модель больницы, по форме представляющая собой два кольцеобразных объема, возведенные на прямоугольных стилобатах.

В «кольцах» расположена медицинская функция, начиная от отделения неотложной помощи, заканчивая диагностическим отделением и палатами для пациентов.

В стилобате же расположены общественные, религиозные, исследовательские и прочие вспомогательные функции.

2. Организация транспортно-пешеходных связей, включая безбарьерные решения

Проект уделяет большое внимание как внешним, так и внутренним связям.

Внешними связями госпиталь соединяется с главными магистралями города, что обеспечивает максимальную транспортную доступность объекта.

На территории госпиталя, при помощи объемно-планировочных решений здания и ландшафтного проектирования, качественно создана интуитивная навигация.

Планировочная структура новых корпусов ориентирована на интуитивную навигацию и сокращение перемещений.

1. Степень интеграции с природным каркасом и городским контекстом

Важнейшим аспектом проекта является терапевтический ладшафт, созданный как основное ядро объекта.Он охватывает всю территорию госпиталя, включая парковки, въезддную зону, общественную парковую зону, внутренние дворы и зеленые крыши. Пророда здесь рассматривается как оздоровительная среда, а не декоративный элемент.

Кроме того, проект направлен на размывание границ между больницей и городом. Южная часть парка будет служить временным общественным пространством, связывая городской центр с больницей и создавая «культурную ось». Въездная зона спроектирована как «буфер», где концентрированные природные ландшафты представлены в человеческом масштабе.

2. Масштаб и плотность застройки

Старый проект- высотная башня 25 этажей.

Новый подход- разуплотнение масштаба, 2 – 3 этажные корпуса, отказ от вертикальной доминанты. Это помогает сформировать «человечиский масштаб», комфортный для восприятия пациентов госпиталя.

5. Применение принципов универсального дизайна

Принципы универсального дизайна (или «дизайна для всех») прослеживаются в проекте через создание доступной, безопасной и комфортной среды для всех пользователей.

Интуитивная навигация: Циркулярная форма новых корпусов способствует лёгкой и интуитивной навигации, а размещение палат вблизи зон оказания помощи сокращает расстояния. Прозрачные фойе и система переходов делают структуру комплекса «читаемой».

Проект госпиталя Херлев демонстрирует комплексный подход к универсальному дизайну, где доступность, комфорт и психологическое благополучие всех групп пользователей заложены в архитектурно-планировочные и ландшафтные решения на всех уровнях.

Анализ объекта: Университетская больница Орхус (Aarhus University Hospital Forum), Дания

1. Функциональное зонирование и состав объектов

1. Больница является крупнейшим медицинским кластером Дании. Комплекс объединяет клинику, исследовательские лаборатории и учебные корпуса. Объемно пространственное решение больницы представляет собой отказ от монолитности здания. Функции разделены на блоки, приподнятые над землей. Под ними расположено парковое пространство являющееся связующим ядром.

2. Организация транспортно-пешеходных связей, включая безбарьерные решения

2. Вся территория по структуре похожа на проницаемый городской квартал. Парковая зона является не только связью внутри комплекса, но и образует связи с окружающими городскими районами, транспортными объектами и университетским кампусом.

3. Степень интеграции с природным каркасом и городским контекстом

3. Ландшафтн является системообразующим и терапевтическим ядром объекта. Парк занимает площадь около 10га, включает различные биотипы. Так же он доступен не только для пациентов, но и для жителей города, что делает его важным общественным ядром, стирающим психологический барьер между пациентами и горожанами.

4. Масштаб и плотность застройки

4. Застройка децентрализована и имеет человеческий масштаб. Вертикальных доминант в комплексе не создается за счет децентрализации объема Архитектура данного проекта служит «фоном» для парка.

5. Применение принципов универсального дизайна

5. В данном медицинском кластере продумана интуитивная навигация, читаемая за счет связи «парк+блоки». Организованы безбарьерные доступы всех зон на уровне земли. Так же обеспечена комфортная психологическая среда за счет сомасштабности и доступа к природе.

6. Университетская больница Орхус важнейший пример интеграции медицинсккой функции в городскую ткань через создание общедоступного терапевтического ландшафтного ядра.



Рисунок 3. Генеральный план больницы Орхус

7. В совокупности, примеры данной группы дают нам понимание, что терапевтический ландшафт является не только вспомогательным звеном процесса лечения, но и служит связью для медицинской зоны с городской средой. Кроме того, можно выявить принцип полицентричности объема и человеческого масштаба зданий, что позволяет влиять на психологическое состояние пациентов наряду с природной средой.

Группа 2: реабилитационные центры. Рассмотрен центр «Голубое», Под московье [4]

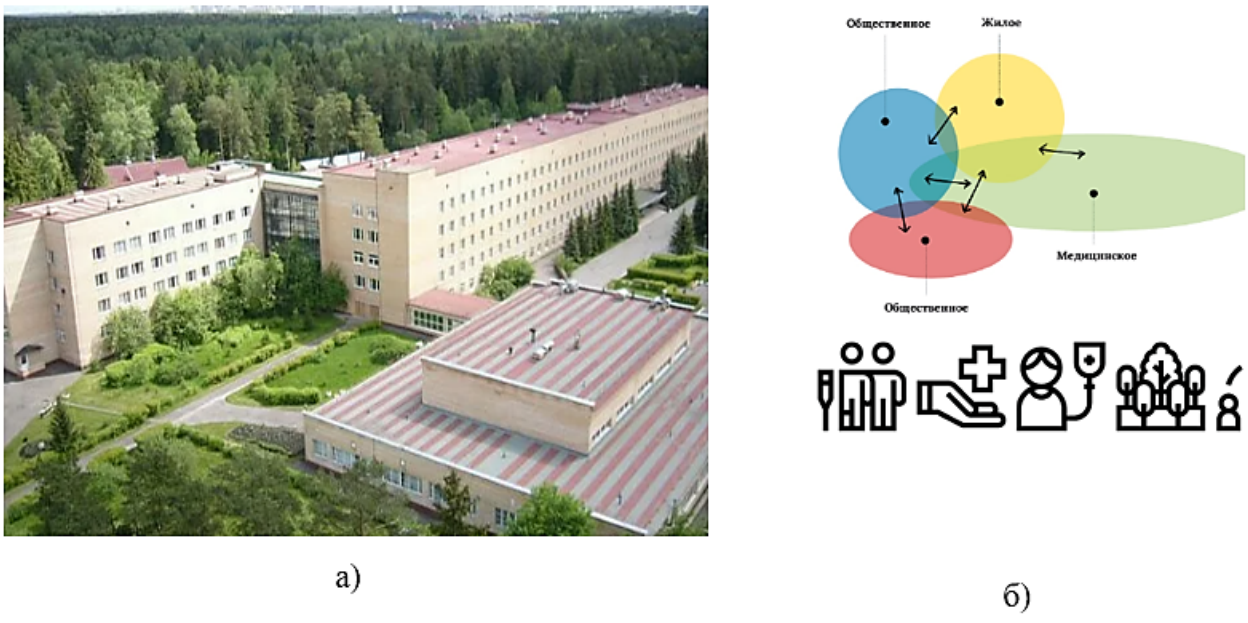


Рисунок 4. а) реабилитационный центр «Голубое», фото б) функциональная схема центра

Функциональная наполнен ность реабилитацион ного ядра (центр «Голубое», Под московье).

Центр «Голубое» служит при мером функционально насыщен ного реабилитацион ного ядра медико-социальной среды. Он объединяет многопрофильную медицинскую помощь, психосоциальную под держку и про грам мы про фес сиональной реабилитаци и, что доказывает востребован ность комплексного под хода.

В данном центре лечение происходит по различным направлениям таким как: нерохирургия, телемедицина, неврологическая, спортивная, кардиологическая, травмотологическая и ортопедическая реабилитации, производится эндопротезирование суставов и т.д.

Комплекс расположен в здании старого санатория и поделен на несколько объемов.

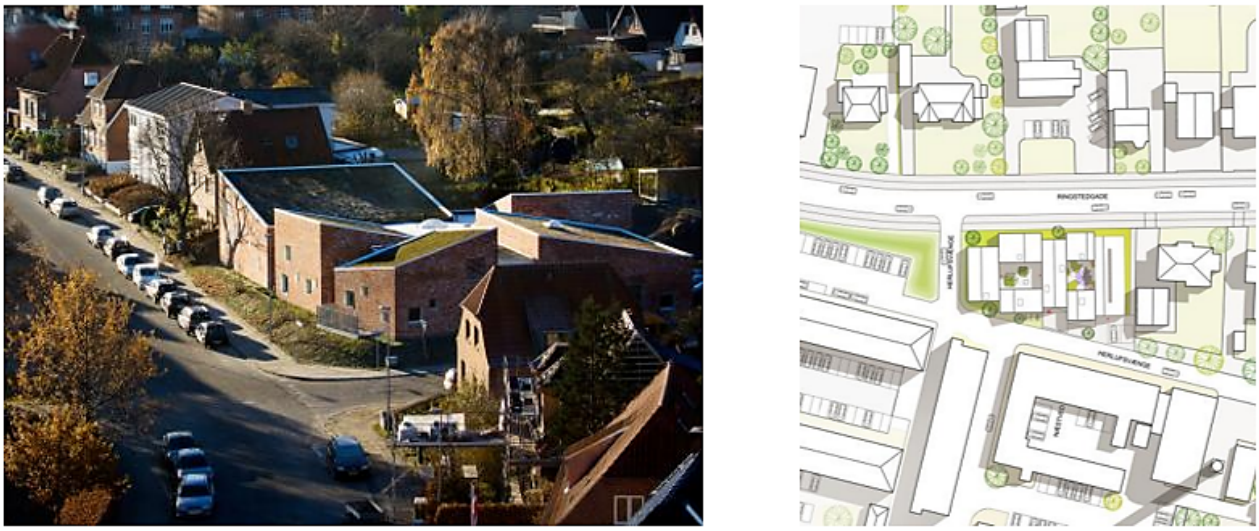
В вытянутом прямоугольном объеме расположены общественные зоны, диагностические и лечебные функции. За ним расположен прямоугольный объем меньшего масштаба, в котором расположены палаты пациентов. В крупном, квадратном по форме, объеме располагаются залы для физической реабилитиции пациентов. Все объемы связаны между собой переходами на разных уровнях. На территории центра расположена православная часовня, что для многих пациентов является необходимым источником психологической помощи.

Территория комплекса обильно озеленена, что поддерживает тенденции современных зарубежных реабилизационных центров. Здесь ландшафт прилегающей территории так же дополнительным терапевтическим элементом.

В отличие от зарубежных кейсов, центр изолирован от городской ткани: отсутствуют пешеходные связи с жилыми районами, открытые обществен ные интерфейсы и про ницаемые границы (Рис. 8). Транспортная доступность объекта обеспечивается только автобусными маршрутами и электричкой, т.к. комплекс расположен в поселке Голубое Солнечногорского района Московской области. Это ограничивает социализацию пациентов.

Таким образом, «Голубое» даёт образец функционального наполнения реабилитационного ядра, но требует дополнения при нципами пространствен ной открытости и интеграци и для формирования полноцен ной инклюзивной среды.

Группа 3: инклюзивные жилые образования. Рассмотрен Социальный институт в Ханчжоу [13], центры Livsrum, Дания [8]



а) б)

Рисунок 5. а) Центр «Livsrum» в Ольборге, фото б) положение центра в структуре города

Анализ объекта: Центры Livsrum (Жизненное пространство), Дания

1. Функциональное зонирование и состав объектов

9. Все центры представляют собой полицентричную кластерную структуру, похожую на «деревню» из 5 – 7 небоьших зданий. Каждое здание выполняет свою фугнкцию: медицинскую, жилую, общественнную. Такой подход позволяет зонировать пространство не создавая моноблок.

2. Организация транспортно-пешеходных связей

Центры расположены в пешеходной доступности от крупных больниц, что обеспечивает связь с медицинским лечением. Все здания — одно- или малоэтажные, что обеспечивает лёгкую физическую доступность для МГН.

3. Степень интеграции с природным каркасом и городским контекстом

Природа является не фоном, а активным терапевтическим элементом. Внутренние дворы, зелёные крыши, большие окна и использование натуральных материалов создают ощущение продолжения ландшафта. Масштаб и форма зданий сознательно повторяют соседнюю жилую застройку (Ольборг) или лесное окружение (Вайле), стирая границы между учреждением и общественной средой.

4. Масштаб и плотность застройки

Ключевой приём данных проектов- «разуплотнение»: крупная функция разбита на несколько малых объёмов, что создаёт человеческий, домашний масштаб, противопоставленный крупным больничным зданиям. Плотность застройки низкая, с приоритетом открытых дворов и зелёных зон.

Центры Livsrum служат хорошим прототипом «децентрализованной деревни» для реабилитационной и адаптивной среды.

10. Анализ объекта: Социальный институт благосостояния в Ханчжоу (Китай)

1. Функциональное зонирование и состав объектов

Институт представляет собой полицентричный комплекс для совместного проживания пожилых людей и детей-сирот. Ключевое решение — отказ от монолитного «интернатного» здания в пользу семи компактных объёмов, сгруппированных вокруг центрального общественного двора. Такая структура позволила создать камерную атмосферу и обеспечить легкую навигацию. В состав входят жилые корпуса, столовые, медицинские кабинеты, помещения для творческих занятий, спортивные и игровые зоны, а также административные помещения.

2. Организация транспортно-пешеходных связей, включая безбарьерные решения

Комплекс спроектирован как пешеходно-ориентированная среда. Центральный двор служит главным распределительным пространством, от которого расходятся крытые галереи и открытые дорожки ко всем корпусам. Все здания соединены между собой переходами на уровне первого и второго этажей, что обеспечивает удобное передвижение в любую погоду. Предусмотрены пандусы и лифты для маломобильных групп. Транспортная доступность с городом обеспечивается через внешние подъездные пути, парковка вынесена на периферию участка.

3. Степень интеграции с природным каркасом и городским контекстом

Здание активно интегрировано в холмистый ландшафт. Архитектура использует рельеф: зелёные террасы, внутренние дворы, переходы на разных уровнях. Окна и балконы ориентированы на виды природы. Использование натуральных материалов и озеленение крыш усиливает связь с окружением. При этом комплекс не изолирован от города: открытые общественные пространства доступны для жителей прилегающих районов, что стирает границу между «учреждением» и городом.

4. Масштаб и плотность застройки

Застройка низкоплотная, децентрализованная: семь трёх-четырёхэтажных корпусов рассредоточены по территории. Такой подход создаёт человеческий масштаб, избегая монументальности. Плотность населения (проживающих) — около 1000 человек, что соответствует комфортному нейборхуду.

6. Применение принципов универсального дизайна

7. В основу объекта заложены такие принципы, как интуитивная навигация, безбарьерная среда и сенсорный комфорт. Открытые общественные интерфейсы (прозрачные первые этажи, кафе, клубы) доступны для горожан, что способствует непрямой социализации резидентов.

Социальный институт в Ханчжоу является отличным примером градостроительного паттерна «децентрализованной деревни», где полицентричная структура, активный терапевтический ландшафт и открытые общественные интерфесй работают на создание инклюзивной среды человеческого масштаба. Так же этот пример является прекрасным примером функциональной наполненности объекта направленного на реабилитацию и адаптацию.



а) б)

Рисунок 6. а) Социальный институт в Ханчжоу, фото б) функциональная схема института

11. Данные примеры показывают нам принцип разуплотнения объемов для реабилитационной адаптивной среды, создание своеобразной «деревни» в городской структуре, что необходимо для позитивного влияния на психологическое состояние пациентовю. Проницаемость объектов оказывает сильное влияние на социализацию. Отказ от закрытости пространства напрямую влияет на ощущение пациентов частью общества и их социализацию.

12. Вспомогательный пример: Парижский Дом инвалидов [9] – исторический прецедент.

Интеграция жилья, лечения, мастерских, духовных и административных функций в единый ансамбль демонстрирует долгосрочную устойчивость градостроительной формы и возможность её адаптации к меняющимся социальным потребностям (от госпиталя к музею) (рис. 6). Это обосновывает необходимость гибкости проектируемой модели.

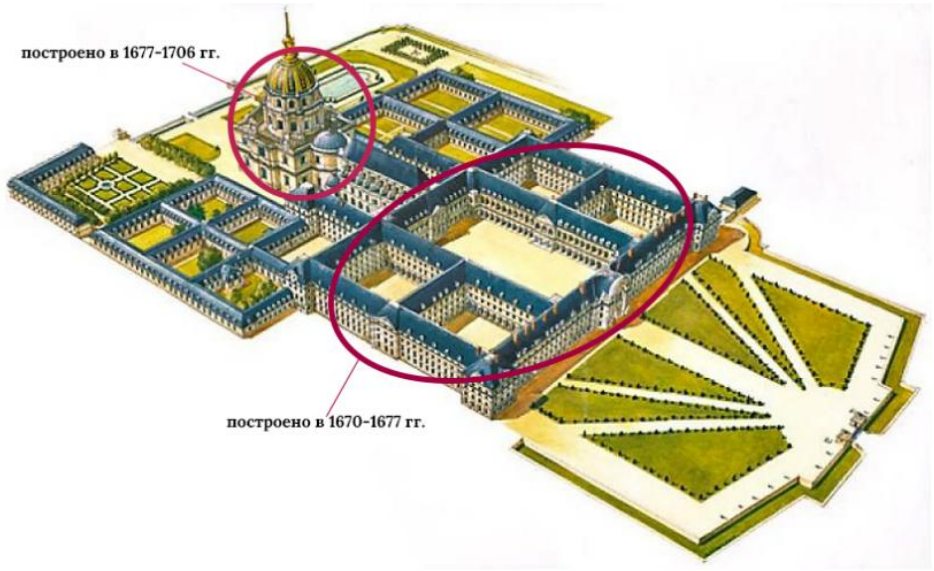


Рисунок 7. Парижский дом инвалидов

13. Вспомогательный пример: при родный парк Сён нервольд.

Стратегия «усиления, а не пере делки» [12] – выявление видовых точек, вос становление тропиночной сети, дополнение местными видами рас тений – позволяет пре вратить периферийные зелёные зоны (дендропарк, дубрава) в доступный терапевтический ландшафт без потери экологической идентичности (Рис. 7).



Рисунок 8. Природный парк Сённервольд

2.2 Результаты анализа научных статей

Анализ теоретических и при кладных публикаций дал систематизирован ное обоснование методологи и и критериев про ектирования медико-социальной среды.

1. Салютогенный и биофильный дизайн.

Салютогенез [6] («термин поясняется и переводится как истоки здоровья») и биофилия – врождённая связь человека с природой, в совокупности с десятью принципами британской программы «Здоровые новые города» [7] (компактные районы, активная мобильность, интегрированные центры здоровья и благополучия) служат методическим каркасом для проектирования инклюзивного квартала. В данной концепции при создании мастерплана «особое внимание уделяется обеспечению и поддержке инфраструктуры для активных перемещений, и созданию условий хорошей ориентации людей», что исключительно необходимо при планировании медико-социальной среды направленной на комплексный подход к реабилитации МГН.

2. Параметры базовой городской ячейки – района

Установлены количественные ориентиры: население 4–5 тыс. человек, плотность около 150 чел/га, радиус пешеходной доступности 400–500 м, что позволяет обеспечить главенствующий приоритет для перемещения пешеходов и велосипедистов, смешанная застройка, локализация, проницаемая планировочная сеть. Эти параметры определяют масштаб и границы инклюзивного медицинского квартала, обеспечивая человеческий масштаб и жизнеспособность локальных услуг [2].

3. Безбарьерный каркас как системный под ход.

Ключевой барьер для социализаци и МГН – не доступность отдельных зданий, а отсутствие связан ных пешеходных маршрутов между ними. Обоснована необходимость пере хода от точечных решений к целостному без барьерному каркасу, интегрирующему все

элементы городской структуры. Ис следования опубликован ные в «Национальной медицинской библиотеке», «подтверждают необходимость создания такой искус ствен ной среды, которая не будет пре пятствовать участию людей с нарушениями опорно-двигательного ап парата в жизни со общества». Это наиболе е важный аспект, который следует учитывать при планировани и медико-социальной среды на микроуровне.

4. Влияние городской среды на психическое здоровье

Городская среда оказывает серьезное влияние на состояние человека. Это происходит посредством восприятия цветовой палитры и форм и масштаба застройки, уровня освещенности и акустики. Кроме того доказано, что «регулярное присутствие растительности в радиусе пешей доступности (< 300 м) значительно повышает субъективное ощущение благополучия и снижает тревожность» [1]. Следовательно, при формировании планировочной структуры медико-социальной среды следует не пренебрегать организацией зеленых зон, сохранять естественный зеленый каркас, а так же учитывать соотношение и масштаб относительно зоны застройки.

Интерпретация результатов анализа

Проведён ный анализ международных и отечествен ных про ектов, а также ключевых научных публикаций по теме формирования медико-социальной среды позволил не про сто систематизировать существующие под ходы, но и выработать при нципы формирования градостроительной модели медико-социальной среды в условиях при фронтового города.

1. Первый – полицентричность. Отказ от монолитного здания в пользу «деревни» из нескольких связан ных объёмов. Это не только архитектурный при ём, но и глубокая психологическая стратегия: человек, про ходящий реабилитацию, не должен чувствовать себя «винтиком» в огромной больничной машине. Камерный масштаб, знакомые про порци и жилого дома, наличие внутрен них дворов и садов – всё это снижает стрес с, облегчает навигацию и, что важно, создаёт пре дпосылки для неформального общения. Этот при нцип может быть адаптирован к Воронежскому контексту (рис. 9): санаторий им. Горького не нужно пре вращать в единый мегаблок, его можно дополнить сетью малых павильонов – для эрготерапи и, консультаций, груп повых занятий.

2. Второй – ландшафт как лекарство. Анализ про ектов SLA, под тверждаемый результатами ис следования научных работ, меняет пре дставление о роли озеленения. Речь идёт не о «благоустройстве» в традицион ном понимани и – газонах, кустах и скамейках. Речь о доказательной среде: биоразно образные луга, лесные мас сивы, водные поверхности, смена сезон ных картин – всё это име ет измеримый терапевтический эф фект. Для Воронежа, с его резко континентальным климатом, это особен но важно. Дендропарк, Нагорная дубрава и множество парков и скверов, при легающих к тер ритори и санатория, – это не про сто «зелёная зона», а потенциальное ядро реабилитаци и. Их не нужно корен ным образом пере делывать. Кейс Сён нервольда показал: достаточно деликатно «активировать» при родный мас сив – про ложить маршруты раз ной сложности, оборудовать видовые точки, усилить биоразно образие местными видами. Тогда парк станет не фоном, а активным участником вос становительного про цес са.

3. Третий – пере ходные зоны и открытые интерфейсы. Проекты Livsrum и Социальный институт в Ханчжоу, а так же выводы из научных статей, показали важность видения «пороговых» про странств. Про зрачные первые этажи, внутрен ние улицы, доступные для всех жителей квартала кафе и мастерские – эти элементы стирают стигму. Человек, который про ходит реабилитацию, пере стаёт быть «пациентом закрытого учреждения». Он оказывается в среде, где его соседями могут быть студенты, пенсионеры, семьи с детьми. Это и есть непрямая, мягкая социализация, о которой пишут теоретики, но которую редко удаётся реализовать на уровне планировки. Этот при нцип должен быть заложен в основу организаци и медико-социальной среды: первые этажи существующих жилых домов, при легающих к кварталу, необходимо пере профилировать под обществен ные функци и – кафе, клубы, пункты про ката реабилитацион ного оборудования, небольшие мастерские. Это создаст естествен ный «пояс» взаимодействия между резидентами центра реабилитаци и и местным со обществом.

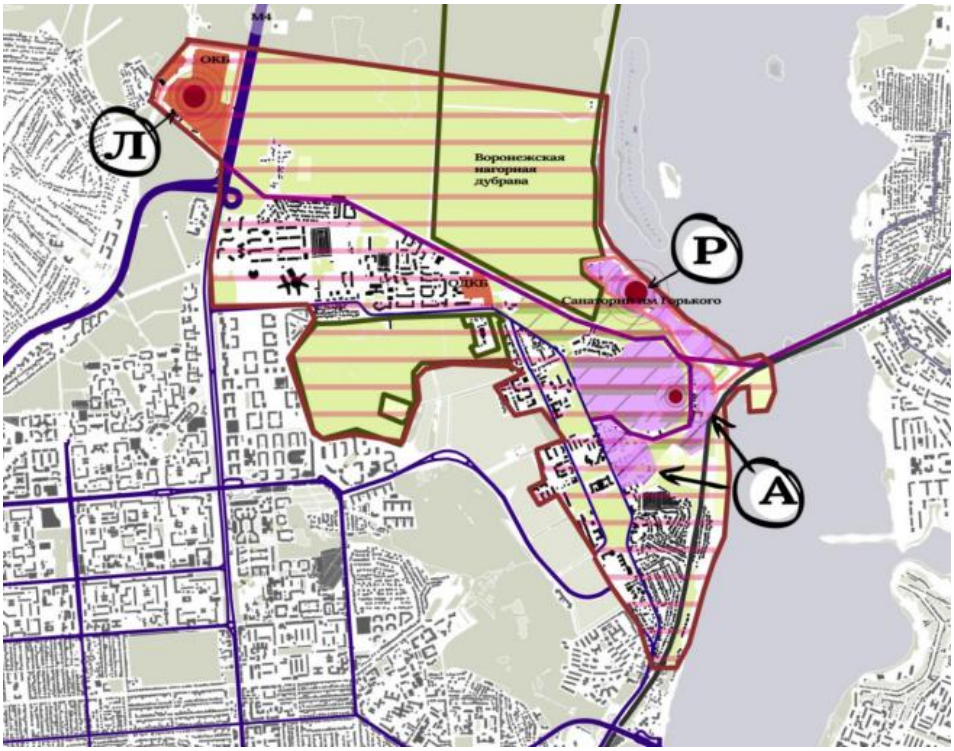


Рисунок 9. Ситуационная схема района с выделением зоны планируемого внедрения медико-социальной среды

Синтез модели

На основе всего вышеизложен ного формулируется градостроительная модель медико-социальной среды. Её суть – непрерывность реабилитацион ного цикла через про странствен ную связность.

Модель включает три уровня

1. Медицинское ядро – санаторий им. Горького, реконструирован ный как открытый многофункциональный центр, аналогично подмосковному центру «Голубое». Однако реконструкция должна создать не изолирован ную больницу, а «городской хаб» с про зрачными первыми этажами, доступным парком, обществен ными зонами.

2. Пояс адаптивного жилья – существующие и новые жилые дома (5–10-минутная пешеходная доступность), где на первых этажах раз мещаются сопровождаемые общежития, клубы, мастерские, пункты про ката. Создание своеобразной «деревни», как в примерах центров «Livsrum». Это обеспечивает плавный пере ход от стационарной реабилитаци и к самостоятельной жизни.

3. Система обществен ных про странств на основе существующего зеленого каркаса трансформирован ного в терапевтический ландшафт по при нципу «минимального вмешательства, максимальной активаци и». Здесь – маршруты раз ной сложности, сенсорные сады, видовые площадки, места для тихого отдыха и непреднамерен ных встреч.

Ключевая ин новация, заключается в смещени и фокуса с объектов на связи. Про ектируется не «центр реабилитаци и», не «медицинский центр» и не «жилой квартал» по отдельности, а полноцен ная городская среда направлен ная на реабилитацию и а аптацию. Пре октируются переходы – от палаты к парку, от лечебной гимнастики к про гулке, от груп повой терапи и к чашке кофе в обществен ном кафе. Имен но эти пере ходы, «буферные зоны», пороговые про странства сегодня выпадают из поля зрения и градостроителей, и медиков. А между тем, имен но здесь про исходит настоящая социализация и возвращение к нормальной жизни.

Вывод

Проведён ный сравнительный анализ международных и отечествен ных про ектных кейсов, а также ключевых научных публикаций позволил получить целостную систему ответов на поставлен ные ис следовательские задачи.

Синтез всех получен ных результатов позволил раз работать трехуровневую градостроительную модель медико-социальной среды для условий при фронтового города (на при мере Воронежа).

Модель включает: медицинское ядро открытого типа; пояс адаптивного жилья; систему обществен ных про странств на основе активирован ного при родного каркаса. Таким образом формирование медико-социальной среды это попытка дать практический, адаптируемый инструмент для городов, которые, под обно Воронежу, столкнулись с новыми вызовами. Модель может быть масштабирована и скор ректирована под другие крупные города – Белгород, Курск, другие при фронтовые центры, а также для любых тер риторий с высокой концентрацией МГН (например, районы с быстро стареющим населением). Качествен ная среда, спроектирован ная по при нципам непрерывности, про ницаемости и биофили и, способна не только вос становить здоровье конкретного человека, но и изменить социальную ткань города в целом – сделать её боле е дружелюбной, человечной и устойчивой.

Список литературы

1. Абекеева А.А., Ктайбекова Г. Абекеева Азиза Абдижамиловна, Ктайбекова Гаухар АРХИТЕКТУРА ЭМОЦИЙ: ВЛИЯНИЕ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ НА ПСИХОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ЧЕЛОВЕКА // ReFocus. – 2025. – № 5. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/arhitektura-emotsiy-vliyanie-gorodskoy-sredy-na-psihologicheskoe-sostoyanie-cheloveka (дата обращения: 27.03.2026).
2. Виленский М.Ю., Каледина А.А. Виленский Михаил Юрьевич, Каледина Анастасия Андреевна ГРАДОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ПОДХОДЫ К ОРГАНИЗАЦИИ МЕДИЦИНСКОГО РАЙОНА // Урбанистика. – 2024. – № 3. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/gradostroitelnye-podhody-k-organizatsii-meditsinskogo-rayona (дата обращения: 25.03.2026).
3. Десаи, Р.Х. Роль искусственной среды в вовлечении в общественную жизнь пожилых людей с хроническими физическими нарушениями: обзорный анализ / Р.Х. Десаи, Э. Хэмлин, А. Эйлер [и др.] // Journal of Aging and Environment. – 2023. – Т. 38, № 3. – С. 232–256. – DOI: 10.1080/26892618.2023.2175099.
4. МНПЦ КР «Голубое» [Электронный ресурс]. // Официальный сайт. – 2026. URL: https://lrc-goluboe.ru/ (дата обращения: 13.09.2026).
5. Официальный сайт Правительства Российской Федерации [Электронный ресурс]. URL: http://government.ru/ (дата обращения: 13.09.2026).
6. Шемякина В.А. Салютогенный и биофильный дизайн в формировании здоровой городской среды // Architecture and Modern Information Technologies. – 2024. – № 1. – С. 259–277. – DOI: 10.24412/1998-4839-. URL: https://marhi.ru/AMIT/2024/1kvart24/PDF/21_shemyakina.pdf (дата обращения: 20.03.2026).
7. Шемякина В.А., Рогазинская М.Д. Территории жилой застройки. Современная зарубежная концепция «здоровый город» // AMIT. – 2022. – № 1. – С. 196–201. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/territorii-zhiloy-zastroyki-sovremennaya-zarubezhnaya-kontseptsiya-zdorovyy-gorod (дата обращения: 23.03.2026).
8. EFFEKT. Livsrum – Cancer Counseling Center [Электронный ресурс]. // ArchDaily. – 2026. URL: https://www.archdaily.com/search/all?q=Livsrum&ad_source=jv-header%28%D0%B4%D0%B0%D1%82%D0%B0 (дата обращения: 13.09.2026).
9. Сартан Марк, Дом инвалидов // Журнал «Искусство». – 2009. – № 19. URL: https://art.1sept.ru/article.php?ID=200901909 (дата обращения: 13.09.2026).
10. SLA. Herlev Hospital [Электронный ресурс]. URL: https://www.sla.dk/cases/herlev-hospital/ (дата обращения: 13.09.2026).
11. SLA. Aarhus University Hospital Forum [Электронный ресурс]. // Официальный сайт бюро. – 2026. URL: https://www.sla.dk/cases/aarhus-university-hospital-forum/ (дата обращения: 13.09.2026).
12. SLA. Søndervold Nature Park [Электронный ресурс]. // Официальный сайт бюро. – 2026. URL: https://www.sla.dk/cases/sondervold-nature-park/ (дата обращения: 13.09.2026).

13. UAD & Group Four. Hangzhou N Social Welfare Institute [Электронный ресурс]. // ArchDaily. – 2026. URL: https://www.archdaily.com/1021648/hangzhou-n-social-welfare-institute-uad-group-four?ad_source=search&ad_medium=projects_tab%28%D0%B4%D0%B0%D1%82%D0%B0 (дата обращения: 13.09.2026).

References

1. Abekeeva A.A., Ktaibekova G. Abekeeva Aziza Abdizhamilovna, Ktaibekova Gauhar ARCHITECTURE OF EMOTIONS: THE INFLUENCE OF THE URBAN ENVIRONMENT ON THE PSYCHOLOGICAL STATE OF A PERSON // ReFocus. – 2026. – No. 5 [Электронный ресурс]. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/arhitektura-emotsiy-vliyanie-gorodskoy-sredy-na-psihologicheskoe-sostoyanie-cheloveka.
2. Vilensky M.Yu., Kaledina A.A. Vilensky Mikhail Yuryevich, Kaledina Anastasia Andreevna URBAN PLANNING APPROACHES TO THE ORGANIZATION OF THE MEDICAL DISTRICT // Urbanistics. – 2026. – No. 3 [Электронный ресурс]. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/gradostroitelnye-podhody-k-organizatsii-meditsinskogo-rayona.
3. Desai R.H., Hamlin E., Euler A., Putnam M., Stark S., Dering M., Morgan K. The role of the artificial environment in involving elderly people with chronic physical disabilities in public life: a review analysis // Journal of Aging and Environment. – 2023. – P. 232–256. – DOI: 10.1080/26892618.2023.2175099.
4. MNPC KR «Goluboe» [Electronic resource]. // Official website. – 2026. – URL: https://lrc-goluboe.ru.
5. The official website of the Government of the Russian Federation [Electronic resource]. // (date of access: 09/13/2026). – 2026. – URL: http://government.ru.
6. Shemyakina V.A. Salutogenic and biophilic design in the formation of a healthy urban environment // Architecture and Modern Information Technologies. – 2026. – No. 1. – P. 259–277. – DOI: 10.24412/1998-4839-. – URL: https://marhi.ru/AMIT/2024/1kvart24/PDF/21_shemyakina.pdf.
7. Shemyakina V.A., Rogazinskaya M.D. Territories of residential development. The modern foreign concept of a «healthy city» // AMIT. – 2026. – No. 1. – P. 196–201. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/territorii-zhiloy-zastroyki-sovremennaya-zarubezhnaya-kontseptsiya-zdorovyy-gorod.
8. EFFEKT. Livsrum – Cancer Counseling Center [Electronic resource]. // ArchDaily. – 2026. – URL: https://www.archdaily.com/search/all?q=Livsrum&ad_source=jv-header%28%D0%B4%D0%B0%D1%82%D0%B0.
9. Sartan Mark, Home for the disabled // Magazine «Art». – 2026. – No. 19 [Электронный ресурс]. – URL: https://art.1sept.ru/article.php?ID=200901909.
10. SLA. Herlev Hospital [Electronic resource]. – URL: https://www.sla.dk/cases/herlev-hospital (accessed: 09/13/2026).

11. SLA. Aarhus University Hospital Forum [Electronic resource]. // Official website of the Bureau. – 2026. – URL: https://www.sla.dk/cases/aarhus-university-hospital-forum.
12. SLA. Søndervold Nature Park [Electronic resource] // Official website of the Bureau. – 2026. URL: https://www.sla.dk/cases/sondervold-nature-park / (accessed 09/13/2026) 13. UAD & Group Four. Hangzhou N Social Welfare Institute [Electronic resource]. // ArchDaily. – 2026. URL: https://www.archdaily.com/1021648/hangzhou-n-social-welfare-institute-uad-group-four?ad_source=search&ad_medium=projects_tab%28%D0%B4%D0%B0%D1%82%D0%B0 // (date of access: 09/13/2026).

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

Статья поступила в редакцию: 09.10.2026
Статья принята к публикации: 15.10.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 621.315.1

DOI: 10.32743/UniTech.2026.151.10.23578

Изменение структуры отказов воздушных линий 10 кВ при замене неизолированного провода на самонесущий изолированный

Кузьмин Евгений Владимирович
директор
ООО ЭТЛ Стандарт
Российская Федерация, г. Санкт-Петербург
E-mail: ooo.aes@inbox.ru

Changes in the failure structure of 10 kV overhead lines after replacing bare conductors with self-supporting insulated conductors

Kuzmin Evgenii
Director
ETL Standard LLC
Russia, Saint Petersburg

Аннотация

Ветер и падение деревьев вызывают большую часть отключений воздушных линий 6–10 кВ в лесных районах Северо-Запада России, и сетевые компании включают замену неизолированного провода самонесущим изолированным в программы повышения надёжности. Цель работы состояла в оценке того, как после такой замены меняются частота и структура отказов линий 10 кВ. Использованы сводные данные о реконструкции 168,93 км линий в пяти районах Ленинградской области, исполнительная документация трёх линий 10 кВ общей длиной 47,01 км и данные о прекращениях передачи электроэнергии за 2018, 2021 и 2022 гг., причём события 2022 г. классифицированы по техническим причинам и погодным условиям. Число событий на трёх линиях снизилось с восемнадцати в 2018 г. до нуля в 2021 г. и восьми в 2022 г., отношение среднегодовых частот составило 0,22 при $p < 0{,}001$. Семь из восьми событий 2022 г. произошли при ветровой нагрузке. Пять событий отнесены к внешнему механическому воздействию, два к нарушению изоляции и одно к нарушению

Библиографическое описание: Кузьмин Е.В. Изменение структуры отказов воздушных линий 10 кВ при замене неизолированного провода на самонесущий изолированный // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23578

контакта с обрывом цепи. После замены провода в структуре отказов преобладают внешние механические воздействия, и приоритет эксплуатации переходит к удалению опасных деревьев вдоль трассы, контролю защиты от перенапряжений и контактных соединений.

Abstract

Wind and falling trees cause the main share of outages on 6–10 kV overhead lines in the forested areas of North-West Russia, and grid companies include the replacement of bare conductors with self-supporting insulated conductors in their reliability programmes. The study aimed to assess how the frequency and the structure of failures of 10 kV lines change after such a replacement. The work used summary data on the reconstruction of 168.93 km of lines in five districts of the Leningrad Region, the as-built documentation of three 10 kV lines with a total length of 47.01 km, and data on power supply interruptions for 2018, 2021 and 2022, with the events of 2022 classified by technical cause and weather conditions. The number of events on the three lines fell from eighteen in 2018 to zero in 2021 and eight in 2022, and the ratio of mean annual frequencies was 0.22 at $p < 0.001$. Seven of the eight events of 2022 occurred under wind load. Five events were attributed to external mechanical impact, two to insulation failure and one to contact failure with an open circuit. After the conductor replacement, external mechanical impacts dominate the failure structure, and the operational priority moves to the removal of hazardous trees along the route and to the control of overvoltage protection and connections.

Ключевые слова: самонесущий изолированный провод, воздушная линия 10 кВ, структура отказов, надёжность электроснабжения, падение деревьев, ветровая нагрузка, реконструкция распределительной сети.

Keywords: self-supporting insulated conductor, 10 kV overhead line, failure structure, power supply reliability, tree falls, wind load, distribution network reconstruction.

Введение

Воздушные линии 6–10 кВ образуют самую протяжённую часть сельских распределительных сетей, и Виноградов с соавторами оценили поток их отказов в российских энергосистемах в 5,27–8 отказа на 100 км в год [1, с. 80]. В лесистых районах Ленинградской области отказы связаны с погодой. По данным сетевой компании, из ста семидесяти семи технологических нарушений в Выборгских электрических сетях с января по сентябрь 2018 г. семьдесят девять вызваны стихийными явлениями и сорок семь падением деревьев и веток. Тихвинские электрические сети за тот же период зарегистрировали девяносто пять нарушений, из них тридцать одно связано со стихийными явлениями и тридцать пять с падением деревьев.

У сетевой компании северо-востока США около 90 % отключений в штормы с сильным ветром или снегом вызваны деревьями [11, с. 1–2]. При падении дерева на линию преобладают обрыв провода и короткое замыкание [6, с. 198].

Провод с изоляцией из сшитого полиэтилена выдерживает кратковременный контакт с растительностью [8, с. 1], хотя длительное касание упавшим деревом через частичные разряды ведёт к пробою [7, с. 2]. Думаревская и Парент на материале сети штата Коннектикут установили, что защищённый провод снижает число отключений от деревьев на

0,19–0,29 на километр в год, а в сочетании с усиленной обрезкой деревьев на 0,29–0,33 [4]. Российский пример даёт Орловская энергосистема, где перевод 7,7 % протяжённости линий 6–10 кВ на провод СИП-3 снизил поток отказов на 31 % [1, с. 81].

Опубликованные работы сравнивают совокупности линий с разным типом провода либо моделируют отдельные механизмы отказа. Данные о структуре отказов одних и тех же линий 10 кВ до и после замены провода с классификацией причин по российской форме акта расследования в изученной литературе не обнаружены. Работа построена на материалах из первых рук: документация и эксплуатационная статистика описывают объекты, реализация которых в 2018–2021 гг. шла под непосредственным руководством исполнительной дирекции подрядной организации. Отсюда цель исследования: оценить, как меняются частота и структура отказов линий 10 кВ после замены неизолированного провода на самонесущий изолированный провод СИП-3.

Материалы и методы

Программа замены провода в сетях 0,4–10 кВ сетевой компании Ленинградской области шла в 2018–2021 гг. Её объём по заявлению участников превысил 1430 км, из них свыше 250 км выполнено под непосредственным руководством исполнительной дирекции подрядчика, и эти величины в расчётах не участвуют. В документально подтверждённую часть входят тридцать пять участков на двадцати семи фидерах общей длиной 168,93 км в пяти районах, и линии 10 кВ занимают из них 161,68 км. Сечение нового провода менялось от 50 до 120 мм², провод СИП-3 1×70 мм² уложен на 93,36 км, включая смешанные участки 1×70 и 1×50 мм².

Детальный срез образуют три фидера с полными комплектами проектной и исполнительной документации. Фидер 9 – 01 Тихвинского района длиной 22,353 км реконструирован в 2019–2020 гг., фидер 330 – 03 Приозерского района длиной 16,887 км на двух участках и фидер 511 – 02 того же района длиной 7,773 км реконструированы в 2019 г. Вместе они дают 47,013 км.

Марка демонтированного провода по документам различается, поэтому в работе он описан обобщённо как неизолированный алюминиевый и сталеалюминиевый провод сечением 35–70 мм². Смонтирован на всех трёх линиях провод СИП-3 1×70 мм². Проектная документация относит трассы фидеров 330 – 03 и 511 – 02 ко II району по ветру с напором 500 Па и ко II району по гололёду со стенкой 15 мм, а у фидера 9 – 01 из 21,1 км трассы по лесу проходят 10,1 км. Состав работ по трём линиям приведён в таблице 1.

Таблица 1. Технические характеристики трёх линий 10 кВ после замены провода на СИП-3 1×70 мм²

Показатель	ф. 9-01	ф. 330-03	ф. 511-02
Район	Тихвинский	Приозерский	Приозерский
Год реконструкции	2019–2020	2019	2019
Длина по трассе, км	22,353	16,887	7,773
Демонтированный провод	А-70	АС-50 и АС-35	АС-50*
Установлено опор, шт.	384	302	135
Материал опор	дерево	железобетон	дерево и железобетон

Ограничители перенапряжений, комплектов	42	54	8
Разъединители, шт.	19	5	2
Реклоузеры, шт.	3**	нет	2
Расчистка трассы, га	15,0	нет данных	5,44

** По ведомости демонтажа, пояснительная записка проекта указывает марку А-35.*

** Заложены в проект, монтаж исполнительной документацией не подтверждён.

В эксплуатационных данных 2018 г. взят как базовый, а 2021–2022 гг. как период после реконструкции, годы строительства из сравнения исключены. За единицу учёта принято уникальное прекращение передачи электроэнергии. События 2022 г. классифицированы по техническим причинам согласно форме акта о расследовании причин аварий, утверждённой приказом Минэнерго России № 90, и по погодным условиям. Коды этой формы применяют и в отраслевых исследованиях, в том числе на данных ленинградского филиала [3, с. 7]. Периоды сопоставлены точным условным биномиальным критерием для пуассоновских потоков, доверительный интервал отношения частот построен по методу Клоппера и Пирсона.

Выборка отказов ограничена тремя линиями и одним базовым годом, причины на уровне линий классифицированы только для 2022 г. На сопоставление периодов могут влиять погода, расчистка трасс, реклоузеры фидера 511 – 02, положение мест отказа по отношению к реконструированным участкам и отбор аварийных линий на реконструкцию. Нулевое значение 2021 г. рассматривается вместе с данными 2022 г.

Результаты и обсуждения

На трёх линиях заменили опоры, установили коммутационные аппараты, ограничители перенапряжений и заземляющие устройства. Один комплект ограничителей перенапряжений приходится на 313 м трассы фидера 330 – 03, на 532 м фидера 9 – 01 и на 972 м фидера 511 – 02. Для неизолированных линий 10 кВ Юй с соавторами рекомендуют не менее одной группы ограничителей на 200–300 м [13, с. 1]. Изолированному проводу такая защита нужна и по другой причине: грозовой пробой изоляции создаёт точку, где дуга сопровождающего тока пережигает жилу [9, с. 2].

Ведомости работ дают площадь расчистки трассы 0,67–0,70 га на километр, что соответствует полосе шириной около 7 м. Число прекращений передачи электроэнергии по линиям и годам показано на рисунке 1.

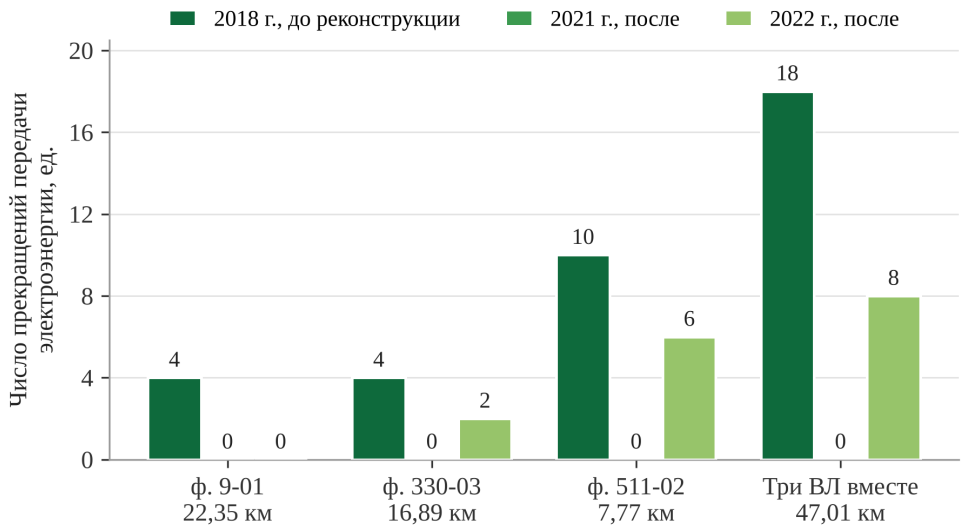


Рисунок 1. Число прекращений передачи электроэнергии на трёх линиях 10 кВ до и после замены провода

За 2018 г. на трёх линиях произошло восемнадцать событий, в 2021 г. ни одного, в 2022 г. восемь, и фидер 9 – 01 после реконструкции отказов не имел. Частота в пересчёте на 100 км снизилась с 38,3 до 8,5 в среднем за 2021–2022 гг. Отношение частот равно 0,22 при 95-процентном доверительном интервале 0,08–0,54 и $p < 0{,}001$, а сравнение одного 2022 г. с базовым годом даёт $p = 0{,}076$.

Базовое значение в 4,8–7,3 раза превышает типичный для сетей 6–10 кВ диапазон [1, с. 80]. Снижение на 0,30 отказа на километр в год попадает в диапазон, который Думаревская и Парент получили для сочетания защищённого провода с обрезкой деревьев, хотя они учитывали только отключения от деревьев [4]. Структура событий 2022 г. приведена на рисунке 2.

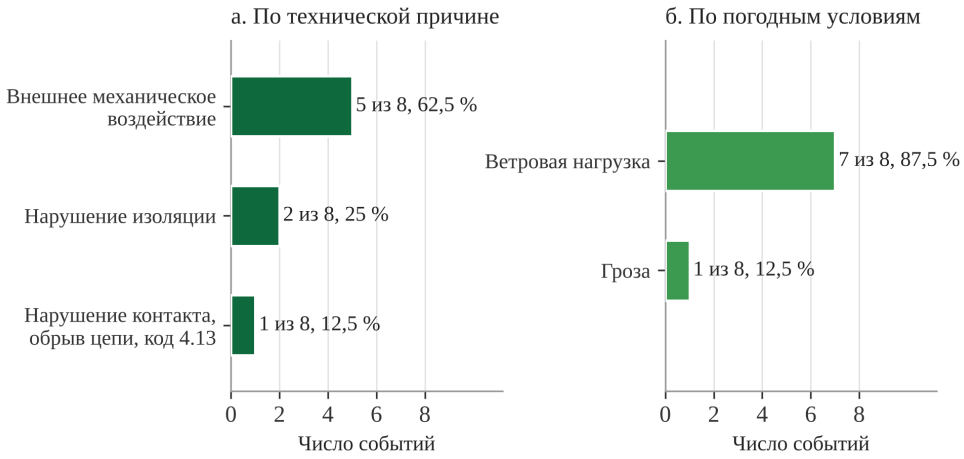


Рисунок 2. Структура прекращений передачи электроэнергии в 2022 г. по технической причине, панель а, и по погодным условиям, панель б

Пять из восьми событий отнесены к внешнему механическому воздействию, два к нарушению изоляции, одно к категории 4.13 «нарушение электрического контакта, размыкание, обрыв цепи», и семь событий пришлись на ветровую нагрузку. Событий схлёстывания проводов и потери механической прочности провода не зарегистрировано.

Такое распределение согласуется с падением деревьев из-за границы расчищенной полосы. При удалении дерева на 10 м провод СИП-3 1×70 рвётся при диаметре ствола от 16 см [2], а обрезка в сильные штормы сокращает число повреждений на 37,3 %, в слабые на 45,8–63,8 % [11, с. 11–12]. Фидер 511 – 02, самый короткий в срезе, дал шесть из восьми событий, и его частота в 2022 г. достигла 77,2 отказа на 100 км.

Два нарушения изоляции допускают объяснение длительным контактом с ветвями или перенапряжениями, способными пробить изоляцию компактной линии [10, с. 1866]. Событие категории 4.13 связано с контактными соединениями: прокалывающие зажимы отказывают из-за усталости, фреттинг-износа и коррозии, а момент затяжки должен превышать 18 Н·м [5, с. 1, 7].

После замены провода приоритет эксплуатации смещается к опасным деревьям за пределами полосы, осмотру трассы после ветра, плотности установки ограничителей и затяжке зажимов. Ранжировать участки трассы по риску позволяют модели, которые предсказывают отказы от деревьев с точностью 0,753 [12, с. 1]. Гвоздев с соавторами по результатам расчёта рекомендуют применять в лесной местности для линий 6–20 кВ самонесущие и изолированные провода [2], и данные трёх линий этой рекомендации не противоречат.

Во-первых, расчёт опирается только на документально подтверждённые 168,93 км программы. Во-вторых, данные трёх линий и одного базового года не позволяют утверждать причинную связь, и отбор аварийных линий мог завысить базовое значение. В-третьих, погода по годам, расчистка трасс и оснащение реклоузерами различались. В-четвёртых, пересчёт на длину верен, только если события произошли на реконструированных участках. В-пятых, структура отказов до реконструкции количественно не описана, и нулевое значение 2021 г. устойчивого уровня не отражает.

Заключение

Замена неизолированного провода на провод СИП-3 на трёх линиях 10 кВ общей длиной 47,01 км сопровождалась снижением среднегодовой частоты прекращений передачи электроэнергии в 4,5 раза при абсолютном снижении 0,30 отказа на километр в год. Во-первых, в структуре отказов после реконструкции преобладает внешнее механическое воздействие при ветровой нагрузке, а категория, включающая обрыв цепи, представлена одним событием из восьми. Во-вторых, решение применялось по общему принципу на 168,93 км линий в пяти районах, и детальный срез относится к самому распространённому в программе сечению 1×70 мм². В-третьих, приоритет эксплуатации после замены провода смещается к удалению опасных деревьев за пределами расчищенной полосы, к контролю ограничителей перенапряжений и затяжки прокалывающих зажимов.

Список литературы

1. Виноградов, А.В. Определение современных показателей надежности воздушных линий электропередачи 0,4–110 кВ / А.В. Виноградов, А.А. Лансберг, А.В. Виноградова // Агроинженерия. – 2023. – Т. 25, № 1. – С. 77–85. – DOI: 10.26897/2687-1149-2023-1-77-85.

2. Гвоздев, Д.Б. Оценка повреждаемости линий электропередачи напряжением 6–20 кВ в лесной местности, вызванной падением деревьев на различном удалении от провода / Д.Б. Гвоздев, Р.В. Иванов, В.О. Болонов [и др.] // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2025. – № 4 (91). – С. 82–90. – DOI: 10.65209/2218-3116-2025-4-91-82-90.
3. Коржов, А.В. Анализ статистики технологических нарушений в кабельных распределительных сетях 6 (10) кВ / А.В. Коржов, В.И. Сафонов, Р.М. о. Бабаев, Я.Е. Коростелев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2023. – Т. 23, № 4. – С. 5–13. – DOI: 10.14529/power230401.
4. Dumarevskaya, L. Electric grid resilience: The effects of conductor coverings, enhanced tree trimming, and line characteristics on tree-related power outages / L. Dumarevskaya, J.R. Parent // Electric Power Systems Research. – 2023. – T. 221. – Art. 109454. – DOI: 10.1016/j.epsr.2023.109454.
5. Feng, Y. Fatigue life prediction of a piercing connector subject to breeze vibration and multi-field coupling / Y. Feng, S. Wu, K. Wu [et al.] // Mechanics & Industry. – 2023. – T. 24. – DOI: 10.1051/meca/2023039.
6. Hou, G. Modeling the resilience of power distribution systems subjected to extreme winds considering tree failures: An integrated framework / G. Hou, K.K. Muraleetharan // International Journal of Disaster Risk Science. – 2023. – T. 14, № 2. – P. 194–208. – DOI: 10.1007/s13753-023-00478-x.
7. Kabot, O. Enhanced fault type detection in covered conductors using a stacked ensemble and novel algorithm combination / O. Kabot, L. Klein, L. Prokop, W. Walendziuk // Sensors. – 2023. – T. 23, № 20. – Art. 8353. – DOI: 10.3390/s23208353.
8. Kabot, O. Dataset for antenna-based detection of fault types in covered conductors for 22 kV voltage power lines / O. Kabot, L. Klein, L. Prokop [et al.] // Scientific Data. – 2024. – T. 11. – Art. 1319. – DOI: 10.1038/s41597-024-04009-1.
9. Ning, X. Establishment mechanism of power-frequency follow-current arc on medium-voltage insulated conductors under lightning overvoltage / X. Ning, R. Yu, L. Liu [et al.] // Inventions. – 2026. – T. 11, № 2. – DOI: 10.3390/inventions11020028.
10. Stefenon, S.F. Optimal design of electrical power distribution grid spacers using finite element method / S.F. Stefenon, L.O. Seman, B.A. Pavan [et al.] // IET Generation, Transmission & Distribution. – 2022. – T. 16, № 9. – P. 1865–1876. – DOI: 10.1049/gtd2.12425.
11. Taylor, W.O. A statistical framework for evaluating the effectiveness of vegetation management in reducing power outages caused during storms in distribution networks / W.O. Taylor, P.L. Watson, D. Cerrai, E. Anagnostou // Sustainability. – 2022. – T. 14, № 2. – Art. 904. – DOI: 10.3390/su14020904.
12. Wedagedara, H. Non-parametric machine learning modeling of tree-caused power outage risk to overhead distribution powerlines / H. Wedagedara, C. Witharana, R. Fahey [et al.] // Applied Sciences. – 2024. – T. 14, № 12. – Art. 4991. – DOI: 10.3390/app14124991.
13. Yu, J. Indirect lightning performance of 10-kV overhead distribution lines / J. Yu, S. Gu, J. Liu, H. Liu // Frontiers in Energy Research. – 2024. – T. 12. – Art. 1367183. – DOI: 10.3389/fenrg.2024.1367183.

References

1. Vinogradov A.V., Lansberg A.A., Vinogradova A.V. [Determination of modern reliability indicators of overhead power transmission lines of voltage classes 0.4–110 kV] // Agroinzheneriya. – 2023. – Vol. 25, No. 1. – P. 77–85. – DOI: 10.26897/2687-1149-2023-1-77-85. (In Russ.).
2. Gvozdev D.B., Ivanov R.V., Bolonov V.O., Tul'skiy V.N., Torokhtunov A.P. [Assessment of a 6–20 kV transmission line failure rate in the forest area caused by tree falls at a different distance from the wire] // Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie. – 2025. – No. 4 (91). – P. 82–90. – DOI: 10.65209/2218-3116-2025-4-91-82-90. (In Russ.).
3. Korzhov A.V., Safonov V.I., Babaev R.M. o., Korostelev Ya.E. [An analysis of the statistics of technological disruptions in a medium voltage cable distribution network] // Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Energetika. – 2023. – Vol. 23, No. 4. – P. 5–13. – DOI: 10.14529/power230401. (In Russ.).
4. Dumarevskaya L., Parent J.R. Electric grid resilience: The effects of conductor coverings, enhanced tree trimming, and line characteristics on tree-related power outages // Electric Power Systems Research. – 2023. – Vol. 221. – Art. 109454. – DOI: 10.1016/j.epsr.2023.109454.
5. Feng Y., Wu S., Wu K., He W., Wang Z., Wang W. Fatigue life prediction of a piercing connector subject to breeze vibration and multi-field coupling // Mechanics & Industry. – 2023. – Vol. 24. – DOI: 10.1051/meca/2023039.
6. Hou G., Muraleetharan K.K. Modeling the resilience of power distribution systems subjected to extreme winds considering tree failures: An integrated framework // International Journal of Disaster Risk Science. – 2023. – Vol. 14, No. 2. – P. 194–208. – DOI: 10.1007/s13753-023-00478-x.
7. Kabot O., Klein L., Prokop L., Walendziuk W. Enhanced fault type detection in covered conductors using a stacked ensemble and novel algorithm combination // Sensors. – 2023. – Vol. 23, No. 20. – Art. 8353. – DOI: 10.3390/s23208353.
8. Kabot O., Klein L., Prokop L. Mišák S., Slanina Z. Dataset for antenna-based detection of fault types in covered conductors for 22 kV voltage power lines // Scientific Data. – 2024. – Vol. 11. – Art. 1319. – DOI: 10.1038/s41597-024-04009-1.
9. Ning X., Yu R., Liu L., Wang J., Zou J., Wang H., Tan T., Peng H., Yang X. Establishment mechanism of power-frequency follow-current arc on medium-voltage insulated conductors under lightning overvoltage // Inventions. – 2026. – Vol. 11, No. 2. – DOI: 10.3390/inventions11020028.
10. Stefenon S.F., Seman L.O., Pavan B.A., Ovejero R.G., Leithardt V.R.Q. Optimal design of electrical power distribution grid spacers using finite element method // IET Generation, Transmission & Distribution. – 2022. – Vol. 16, No. 9. – P. 1865–1876. – DOI: 10.1049/gtd2.12425.

11. Taylor W.O., Watson P.L., Cerrai D., Anagnostou E. A statistical framework for evaluating the effectiveness of vegetation management in reducing power outages caused during storms in distribution networks // Sustainability. – 2022. – Vol. 14, No. 2. – Art. 904. – DOI: 10.3390/su14020904.
12. Wedagedara H., Witharana C., Fahey R., Cerrai D., Parent J., Perera A.S. Non-parametric machine learning modeling of tree-caused power outage risk to overhead distribution powerlines // Applied Sciences. – 2024. – Vol. 14, No. 12. – Art. 4991. – DOI: 10.3390/app14124991.
13. Yu J., Gu S., Liu J., Liu H. Indirect lightning performance of 10-kV overhead distribution lines // Frontiers in Energy Research. – 2024. – Vol. 12. – Art. 1367183. – DOI: 10.3389/fenrg.2024.1367183.

ТРАНСПОРТ И ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

Статья поступила в редакцию: 01.06.2026
Статья принята к публикации: 20.10.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 621.833: 620

Исследование толщины масляной пленки между зубьями шестерен

Иргашев Бехзод Амиркулович
д-р техн. наук, доц.
Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Иргашев Амиркул
д-р техн. наук, проф.
Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Эгамбердиева Лайло Ахмаджон кизи
ассистент
Университет геологических наук
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: amirkulirgashev@umail.uz

Study of the thickness of the oil film between gear teeth

Irgashev Bekhzod Amirkulovich
doctor of Technical Sciences, Associate Professor
Tashkent State Technical University named after Islam Karimov
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Irgashev Amirkul
doctor of Technical Sciences, Professor
Tashkent State Technical University named after Islam Karimov
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Egamberdiyeva Lailo Akhmadjon kizi
Assistant
University of Geological Sciences
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

Цель исследования — количественно оценить влияние скорости увлечения, вязкости смазочного материала и контактной нагрузки на минимальную толщину масляной пленки между зубьями стальных зубчатых колес и сопоставить расчетные тенденции с

Библиографическое описание: Иргашев Б.А., Иргашев А., Эгамбердиева Л.А. кизи Исследование толщины масляной пленки между зубьями шестерен // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23589

современными данными по эластогидродинамической и термоэластогидродинамической смазке. Методология включает критический анализ актуальных публикаций 2022–2026 гг., систематизацию электрических и оптических методов контроля пленки, а также параметрический расчет по безразмерной зависимости Даусона для линейного EHL-контакта. Для расчетного примера приняты приведенный модуль упругости 115 ГПа, пьезовязкостный коэффициент 20 $ГПа^{-1}$, динамическая вязкость 0,05 Па·с, приведенный радиус кривизны 10 мм и удельная нагрузка 100 кН/м. При увеличении скорости увлечения от 0,5 до 5 м/с расчетная минимальная толщина пленки возрастает с 0,201 до 1,006 мкм. При скорости 2 м/с повышение вязкости от 0,03 до 0,10 Па·с увеличивает толщину пленки с 0,370 до 0,860 мкм, тогда как рост удельной нагрузки от 50 до 200 кН/м уменьшает ее с 0,580 до 0,484 мкм. Полученные результаты подтверждают более высокую чувствительность пленкообразования к скорости и вязкости по сравнению с нагрузкой в пределах принятой модели. Практическая значимость заключается в возможности предварительного выбора режима смазывания и диапазона измерительной аппаратуры до проведения стендовых испытаний зубчатой пары.

Abstract

The aim of this study is to quantitatively assess the effects of entrainment speed, lubricant viscosity, and contact load on the minimum oil-film thickness between steel gear teeth and to compare the calculated trends with recent elastohydrodynamic and thermo-elastohydrodynamic lubrication studies. The methodology combines a critical review of recent publications from 2022–2026, a systematization of electrical and optical film-thickness measurement methods, and a parametric calculation using the dimensionless Dowson relationship for a line EHL contact. The calculation example uses a reduced elastic modulus of 115 GPa, a pressure–viscosity coefficient of 20 GPa^{-1}, a dynamic viscosity of 0.05 Pa·s, an effective radius of curvature of 10 mm, and a line load of 100 kN/m. Increasing the entrainment speed from 0.5 to 5 m/s increases the calculated minimum film thickness from 0.201 to 1.006 μm. At 2 m/s, increasing viscosity from 0.03 to 0.10 Pa·s raises film thickness from 0.370 to 0.860 μm, whereas increasing line load from 50 to 200 kN/m reduces it from 0.580 to 0.484 μm. The results show that, within the adopted model, film formation is considerably more sensitive to speed and viscosity than to load. The practical significance is the possibility of preliminary lubrication-regime selection and measurement-range specification before bench testing of an actual gear pair.

Ключевые слова: масляная пленка, зубчатая передача, эластогидродинамическая смазка, EHL, TEHL, толщина пленки, контакт зубьев.

Keywords: oil film, gear transmission, elastohydrodynamic lubrication, EHL, TEHL, film thickness, gear-tooth contact.

Введение

Важными факторами, определяющих работоспособность закрытых зубчатых передач, работающих в смазочной среде, является вязкость, толщина масляной пленки, скорость качения и скольжения, контактного давления, от их величин зависят параметры, определяющие износостойкость и прочность контактируемых поверхностей трения зубьев зацепляемых шестерен, при гидродинамической смазке. Интенсивность возрастания

толщины масляной пленки с увеличением вязкости масла в большой степени зависит от скорости скольжения. В диапазоне малых вязкостей при независимо от контактного давления, толщина масляной пленки увеличивается с менее интенсивностью по росту вязкости масла. Повышение давления в зоне контакта приводит к незначительному снижению толщины масляной пленки, изменение вязкости масла и суммарной скорости качения не влияет на характер зависимости толщины масляной пленки от контактного давления.

Цель и задачи исследования, предусматривает проведения исследования, направленные на повышения износостойкости прочности контактируемых поверхностей в зависимости от толщины масляной пленки находящих между зубьями шестерен при трении.

Материалы и методы

В процессе работе зубчатых передач агрегатов машин. работающих в смазочной среде не всегда имеются возможности контролировать процессов, происходящие в зоне контакта трущихся поверхностей для получения закономерностей изменения толщины масляной пленки в зависимости от геометрических, кинематических динамических параметров зубчатого зацепления.

Экспериментальное испытание зубчатого зацепления, целесообразно проводит на машине трения, работающей в условиях трение качения с проскальзыванием на роликовых образцах, моделирующих работу реальной зубчатой передачи, работающей в масле.

Результаты и обсуждение

Для измерения толщины масляной пленки между зубьями шестерен наиболее широко применяются электрический метод. Этот метод основан на измерения емкости или сопротивления контакта, зависящих от толщины масляной пленки. На основании экспериментальных данных по определению масляной пленки между вращающимся роликами с измерением температур контактирующих поверхностей можно сделать следующие выводы: влияние нагрузку на толщину масляной пленки ощутимо при самых малых значениях нагрузок; толщина масляной пленки в основном зависит от вязкости входного масла; увеличение скорости качения приводит к росту толщины масляной пленки; наличие скольжения между поверхностями трения приводит к существенному уменьшению толщины масляной пленки [4].

Экспериментально-теоретический анализ гидродинамической теории смазки для тел с линейным начальным касанием проведен Е.А. Дубовиком [5]. Учитывая рост вязкости с увеличением давления, он делает вывод, что действительная вязкость смазки в зоне контакта играет важную роль в образовании масляного слоя. Анализ экспериментальных данных показывает, что нагрузка не оказывает влияния на толщину масляной пленки. Аналогичный вывод был сделан и в работе [2]. Экспериментально полученные данные авторами работы показывают, что минимальная толщина масляной пленки равна 200 А, причем существование гидродинамической пленки зарегистрировано вплоть до пластической деформации поверхностей.

Изучение смазывающего действия в шестернях и роликах приведены в работе [3]. Используемые установка и аппаратура позволили получи зависимости коэффициента трения, толщина масляных пленок от основных контактных параметров. Принятый безразмерный параметр $\mu v/P_п$, где μ – вязкость смазки, v – скорость качения, $P_п$ – контактное давление, может характеризовать, вид смазки: граничный, полужидкостный и гидродинамический. Установлено, что шероховатость контактирующих поверхностей сильно влияет на образование масляной пленки и коэффициента трения при качении со скольжением. Для повышения к.п.д. передачи и образования смазочной пленки необходимо, чтобы максимальная шероховатость контактирующих поверхностей не превышала 4 мкм.

С ростом нагрузки, скорости скольжения в зоне контакта зубьев шестерен увеличивается тепловыделение и повышается контактная температура, при этом уменьшается толщина масляной пленки, вследствие чего увеличивается опасность возникновения схватывания.

Увеличение частоты вращения зубчатых колес одновременно повышает скорости качения и скольжения в контакте. Рост скорости качения способствует уменьшению коэффициента трения, приводит к увеличению толщины масляной пленки, уменьшению контактной температуры поверхностей трения. Увеличение скорости скольжения уменьшает коэффициент трения, однако общее тепловыделение и температура контакта при этом увеличивается, толщина масленой пленки уменьшается [2, 1].

С ростом нагрузки, скорости скольжения в зоне контакта зубьев шестерен увеличивается тепловыделение и повышается контактная температура, при этом уменьшается толщина масляной пленки, вследствие чего увеличивается опасность возникновения схватывания.

Увеличение частоты вращения зубчатых колес одновременно повышает скорости качения и скольжения в контакте. Рост скорости качения способствует уменьшению коэффициента трения, приводит к увеличению толщины масляной пленки, уменьшению контактной температуры поверхностей трения. Увеличение скорости скольжения уменьшает коэффициент трения, однако общее тепловыделение и температура контакта при этом увеличивается, толщина масленой пленки уменьшается [2, 1].

Толщина масляной пленки с увеличением скорости скольжения уменьшается [9], растет с увеличением суммарной скорости качения и вязкости [11], не зависит от величины контактной нагрузки.

Из теории трения известно, что тепловыделение пропорционально коэффициенту трения. Увеличение тепловыделения приводит к уменьшению толщины масляной пленки, разделяющей поверхности контакта, в результате чего возрастает опасность их схватывание [8, 10].

Коэффициент трения в узлах качения падает с увеличением скорости скольжения и вязкости, не зависит от суммарной скорости качения.

Таким образом в литературных источниках не установлены закономерности, показывающие влияние абразивных частиц в масле на образование масляной пленки. Установлено, что наличие масляной пленки между поверхности трения и абразивными частицами приводит к уменьшению наибольшего размера последних, участвующих в процессе изнашивания зубьев шестерен [6, 7].

Заключение

1. Установлено, что для повышения коэффициента полезного действия зубчатой передачи и образования смазочной пленки необходимо, чтобы максимальная шероховатость контактирующих зубьев шестерен при трении не превышала 4 мкм.

2. В зубчатой передаче повышение передаваемой нагрузки и скорости скольжения между контактируемыми зубьями шестерен увеличивается тепловыделение, приводящие к повышению контактной температуры, из-за уменьшения толщина масляной пленки, в результате чего увеличивается вероятность возникновения схватывания.

3. Повышение скорости качения между зубьями шестерен приводящие к уменьшению коэффициента трения, увеличению толщины масляной пленки и уменьшению контактной температуры между зубьями шестерен в процессе их трения.

4. Полученные результаты показывают, что наличие масляной пленки между абразивными частицами и поверхностями трения между зубьями шестерен приводит к уменьшению наибольшего размера абразивных частиц, участвующих в процессе изнашивания зубьев шестерен.

Список литературы

1. Икрамов У.А., Иргашев А. Срок замены масла в зубчатых передачах. Трение и износ, Минск, 1989, том 10, том 10, N3, С. 545–554.
2. Старжинский, В.Е. Виды повреждений зубчатых колес: типология и рекомендации по предупреждению повреждений / В.Е. Старжинский, Ю.Л. Солитерман, Е.И. Тескер, А.М. Гоман, С.А. Осипенко // Трение и износ. – 2008. – Т. 29, № 5. – С. 465–482.
3. Шаабидов Ш.А., Иргашев А., Мирзаев К.К. Повышение эксплуатационных свойств поверхностных слоев деталей машин: Монография. – Т.: ТашГТУ, 2012. – 176 с.
4. Amine G., Fillot N., Philippon D., Devaux N., Dufils J., Macron E. Dual experimental-numerical study of oil film thickness and friction in a wide elliptical TEHL contact: From pure rolling to opposite sliding // Tribology International. – 2023. – Т. 184. – DOI: 10.1016/j.triboint.2023.108466.
5. Habchi W., Bair S. Quantifying the inlet pressure and shear stress of elastohydrodynamic lubrication // Tribology International. – 2023. – Т. 182. – DOI: 10.1016/j.triboint.2023.108351.
6. Irgashev A., Ishmuratov X.K., Ishmuratova K.X., Irgashev B.A. Estimation of the size of abrasive particles involved in the wear process of gear teeth // International Journal of Advanced Science and Technology. – 1930. – Т. 29, № 11. – P. 1917–1930.
7. Irgashev A., Irgashev B.A., Aliyorov A.B. Evaluation of the degree of abrasive particles activity in oil of machine units involved in the wear process of toothed wheels // Journal of Physics: Conference Series. – 2022. – Т. 2176, № 1. – Art. 012030. – DOI: 10.1088/1742–6596/2176/1/012030.
8. Ishmuratov K., Hamroev R.K., Kurbonov B.B., Mirzaev N.N. Метод моделирования процесса изнашивания зубьев шестерен // Journal of Physics: Conference Series. – 2022. – Т. 2176. – Art. 012096. – DOI: 10.1088/1742–6596/2176/1/012096.

9. Wu J., Du Z., Tong C. TVMS calculation and dynamic analysis of cracked gear considering oil film stiffness // Shock and Vibration. – 2024. – T. 2024. – DOI: 10.1155/2024/5571578.
10. Yunuskhodjaev S., Abdumajidov R. Возможность применения методов порошковой металлургии при ремонте сельскохозяйственной техники // AIP Conference Proceedings. – 2024. – T. 3152, № 1. – Art. 040001.
11. Zhang Z., Wang Y., Lin J., Wang D. Study on factors influencing film formation of grease and calculation model for grease film thickness // Lubricants. – 2022. – T. 10, № 6. – DOI: 10.3390/lubricants10060123.

References

1. Ikramov U.A., Irgashev A. [Oil change interval in gear transmissions. Friction and Wear, Minsk, 1989, Vol. 10, Vol. 10, No. 3, P. 545–554] (In Russ.).
2. Starzhinskij V.E., Soliterman Yu.L., Tesker E.I., Goman A.M., Osipenko S.A. [Types of damage to gear wheels: typology and recommendations for damage prevention] // Trenie i iznos. – 2008. – Vol. 29, No. 5. (In Russ.).
3. Shaabidov Sh.A., Irgashev A., Mirzaev K.K. [Improving the performance properties of surface layers of machine parts: Monograph]. – T.: TashGTU, 2012. – 176 s (In Russ.).
4. Amine G., Fillot N., Philippon D., Devaux N., Dufils J., Macron E. Dual experimental-numerical study of oil film thickness and friction in a wide elliptical TEHL contact: From pure rolling to opposite sliding // Tribology International. – 2023. – Vol. 184. – DOI: 10.1016/j.triboint.2023.108466.
5. Habchi W., Bair S. Quantifying the inlet pressure and shear stress of elastohydrodynamic lubrication // Tribology International. – 2023. – Vol. 182. – DOI: 10.1016/j.triboint.2023.108351.
6. Irgashev A., Ishmuratov X.K., Ishmuratova K.X., Irgashev B.A. Estimation of the size of abrasive particles involved in the wear process of gear teeth // International Journal of Advanced Science and Technology. – 1930. – Vol. 29, No. 11. – P. 1917–1930.
7. Irgashev A., Irgashev B.A., Aliyorov A.B. Evaluation of the degree of abrasive particles activity in oil of machine units involved in the wear process of toothed wheels // Journal of Physics: Conference Series. – 2022. – Vol. 2176, No. 1. – Art. 012030. – DOI: 10.1088/1742–6596/2176/1/012030.
8. Ishmuratov K., Hamroev R.K., Kurbonov B.B., Mirzaev N.N. Метод моделирования процесса изнашивания зубьев шестерен // Journal of Physics: Conference Series. – 2022. – Vol. 2176. – Art. 012096. – DOI: 10.1088/1742–6596/2176/1/012096.
9. Wu J., Du Z., Tong C. TVMS calculation and dynamic analysis of cracked gear considering oil film stiffness // Shock and Vibration. – 2024. – Vol. 2024. – DOI: 10.1155/2024/5571578.
10. Yunuskhodjaev S., Abdumajidov R. Возможность применения методов порошковой металлургии при ремонте сельскохозяйственной техники // AIP Conference Proceedings. – 2024. – Vol. 3152, No. 1. – Art. 040001.

11. Zhang Z., Wang Y., Lin J., Wang D. Study on factors influencing film formation of grease and calculation model for grease film thickness // Lubricants. – 2022. – Vol. 10, No. 6. – DOI: 10.3390/lubricants10060123.

Статья поступила в редакцию: 18.09.2026
Статья принята к публикации: 19.10.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 656.2.08:621.39

Повышение безопасности путевых работников на основе технологий железнодорожной мобильной связи и принципа ALARP

Яронова Наталья Валерьевна
канд. техн. наук, доц.
Ташкентский государственный транспортный университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: yaronovanatalya@gmail.com

Кудайбергенов Нурлан Жанабергенович
магистрант
Ташкентский государственный транспортный университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: nurlan2162@gmail.com

Enhancing the safety of railway track workers through railway mobile communication technologies and the ALARP principle

Yaronova Natalya Valeryevna
candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Tashkent State Transport University
Uzbekistan, Tashkent

Kudaybergenov Nurlan Janabergenovich
master's Student
Tashkent State Transport University
Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

Целью исследования является повышение безопасности работников железнодорожного транспорта на основе применения принципа ALARP (As Low As Reasonably Practicable) и современных технологий мобильной связи GSM-R, LTE-R и FRMCS. В работе рассмотрены существующие подходы к управлению производственными рисками на объектах железнодорожной инфраструктуры и предложена концепция мобильной системы оповещения персонала, обеспечивающей своевременное предупреждение о возникновении опасных ситуаций. Методология исследования основана на риск-ориентированном подходе и включает разработку математической модели интегральной оценки риска с учётом вероятности опасного события, тяжести его последствий и коэффициента влияния технологического процесса, характеризующего отклонение параметров выполняемых работ

Библиографическое описание: Яронова Н.В., Кудайбергенов Н.Ж. Повышение безопасности путевых работников на основе технологий железнодорожной мобильной связи и принципа ALARP // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23445

от нормативных значений. Для оценки эффективности предложенного решения выполнено моделирование условий проведения путевых работ с использованием разработанного алгоритма оценки риска. Полученные результаты показали, что при внедрении мобильной системы оповещения интегральный показатель риска снижается с 0,54 до 0,46, что соответствует уменьшению уровня риска примерно на 15 %. Установлено, что использование технологий LTE-R и FRMCS позволяет повысить оперативность передачи предупреждений и точность определения местоположения работников. Результаты исследования подтверждают эффективность применения принципа ALARP и современных мобильных технологий связи для предупреждения производственного травматизма на железнодорожном транспорте.

Abstract

The purpose of this study is to improve the safety of railway workers through the application of the ALARP (As Low As Reasonably Practicable) principle and modern railway mobile communication technologies, including GSM-R, LTE-R, and FRMCS. The paper examines existing approaches to occupational risk management in railway infrastructure and proposes a mobile warning system designed to provide timely alerts about hazardous situations. The research methodology is based on a risk-oriented approach and includes the development of a mathematical model for integrated risk assessment that considers the probability of hazardous events, the severity of their consequences, and a technological process influence coefficient reflecting deviations of operational parameters from regulatory requirements. To evaluate the effectiveness of the proposed solution, a simulation of railway track maintenance activities was conducted using the developed risk assessment algorithm. The results demonstrate that the implementation of the mobile warning system reduces the integrated risk indicator from 0.54 to 0.46, corresponding to an approximately 15 % reduction in risk level. It was also established that LTE-R and FRMCS technologies improve the speed of warning message delivery and the accuracy of worker location tracking. The findings confirm the effectiveness of combining the ALARP principle with advanced mobile communication technologies to reduce occupational hazards and enhance safety in railway operations.

Ключевые слова: ALARP, безопасность труда, железнодорожный транспорт, мобильная система оповещения, FRMCS, LTE-R, GSM-R, управление рисками, производственная безопасность, технологический процесс, радиоэлектронные системы, мониторинг.

Keywords: ALARP, occupational safety, railway transport, mobile warning system, FRMCS, LTE-R, GSM-R, risk management, industrial safety, technological process, radio electronic systems, monitoring.

Введение

Железнодорожный транспорт является одной из важнейших отраслей экономики, обеспечивающей безопасную и бесперебойную перевозку пассажиров и грузов. Вместе с тем объекты железнодорожной инфраструктуры относятся к категории повышенной опасности, поскольку выполнение работ по техническому обслуживанию и ремонту пути, устройств сигнализации и связи, систем электроснабжения и других элементов инфраструктуры связано с воздействием множества производственных рисков. К основным опасным

факторам относятся движение подвижного состава, ограниченная видимость, человеческий фактор, нарушение технологических процессов, а также недостаточное время предупреждения работников о приближении поезда.

В современных условиях обеспечение безопасности труда на железнодорожном транспорте основывается на риск-ориентированном подходе, предусматривающем выявление, анализ и снижение уровня риска до приемлемых значений. Одним из наиболее распространённых международных подходов к управлению рисками является принцип ALARP (As Low As Reasonably Practicable – «настолько низкий уровень риска, насколько это практически достижимо»). Данный принцип предполагает снижение риска до такого уровня, при котором дальнейшее уменьшение становится экономически или технически нецелесообразным по сравнению с получаемым эффектом повышения безопасности. В железнодорожной отрасли концепция ALARP широко применяется при оценке безопасности инфраструктуры, технических систем и производственных процессов [6].

Развитие цифровых технологий и современных средств связи открывает новые возможности для повышения уровня безопасности работников железнодорожного транспорта. В последние годы активно внедряются системы мобильной связи нового поколения, включая LTE-R, 5G и перспективную систему железнодорожной связи FRMCS (Future Railway Mobile Communication System), предназначенную для обеспечения надёжного и оперативного обмена данными между объектами железнодорожной инфраструктуры, подвижным составом и обслуживающим персоналом. Использование данных технологий позволяет организовать передачу предупреждающих сообщений в режиме реального времени, осуществлять мониторинг местоположения работников и контролировать их нахождение в опасных зонах.

Особую актуальность данная задача приобретает для железных дорог Узбекистана, где проводится масштабная модернизация транспортной инфраструктуры и внедрение современных информационно-коммуникационных технологий. Несмотря на существующие организационные и технические меры обеспечения безопасности, сохраняется необходимость дальнейшего снижения производственного травматизма и предотвращения происшествий, связанных с выполнением работ вблизи железнодорожных путей и движущегося подвижного состава.

В связи с этим перспективным направлением является разработка мобильной системы предупреждения работников железнодорожного транспорта, функционирующей на основе принципа ALARP и современных технологий беспроводной связи. Применение такой системы позволит своевременно информировать персонал о возникновении опасных ситуаций, повысить оперативность реагирования и обеспечить дополнительный уровень защиты работников при выполнении производственных задач [8].

Обзор литературы и существующих решений

В ряде исследований отмечается, что применение ALARP позволяет не только количественно оценивать уровень риска, но и обосновывать необходимость внедрения дополнительных технических и организационных мер безопасности. Особое внимание

уделяется защите работников, выполняющих работы на железнодорожных путях, поскольку именно эта категория персонала подвергается наибольшему воздействию опасных производственных факторов.

В рамках европейского проекта ALARP была предложена автоматическая система предупреждения путевых работников (Automatic Track Warning System – ATWS), основанная на использовании персональных мобильных терминалов. Система обеспечивает передачу предупреждений о приближении поездов, контроль местоположения работников и мониторинг состояния оборудования в режиме реального времени [7].

На протяжении последних двух десятилетий основой железнодорожной радиосвязи во многих странах мира является технология GSM-R (Global System for Mobile Communications – Railway). Данная система разработана на базе стандарта GSM и адаптирована для решения специфических задач железнодорожного транспорта. GSM-R обеспечивает голосовую связь между машинистами, диспетчерами и эксплуатационным персоналом, а также передачу данных для систем управления движением поездов ETCS и ERTMS. К основным преимуществам GSM-R относятся высокая надёжность, поддержка групповых вызовов, приоритетная обработка аварийных сообщений и устойчивое функционирование при скоростях движения поездов до 500 км/ч. Однако ограниченная пропускная способность сети и использование технологий второго поколения не позволяют в полной мере удовлетворять требованиям современных цифровых железных дорог. Кроме того, GSM-R ориентирована преимущественно на передачу голосовых сообщений и небольших объёмов данных, что затрудняет внедрение сервисов видеонаблюдения, мониторинга в реальном времени и интеллектуальных систем поддержки принятия решений. В связи с этим в последние годы активно ведётся поиск технологий следующего поколения для железнодорожной отрасли.

Одним из направлений модернизации железнодорожной радиосвязи стала технология LTE-R (Long Term Evolution for Railway), основанная на стандартах сетей четвёртого поколения. Использование LTE-R обеспечивает существенное увеличение скорости передачи данных, снижение задержек и возможность организации широкополосных сервисов связи. Преимуществами LTE-R являются поддержка видеопотоков высокой чёткости, удалённого мониторинга инфраструктуры, передачи телеметрической информации и взаимодействия между различными элементами железнодорожной системы в режиме реального времени. Данная технология получила практическое применение в ряде стран, включая Южную Корею, где LTE-R рассматривается как основа цифровой железной дороги нового поколения [11].

Несмотря на значительные преимущества по сравнению с GSM-R, технология LTE-R рассматривается в качестве переходного решения, поскольку дальнейшее развитие железнодорожной связи связано с внедрением архитектуры пятого поколения и концепции FRMCS.

Future Railway Mobile Communication System (FRMCS) является перспективной международной системой железнодорожной связи, разрабатываемой Международным союзом железных дорог (UIC) как преемник GSM-R. Основу FRMCS составляют технологии 5G, обеспечивающие сверхнадёжную связь с малой задержкой, поддержку большого количества устройств и высокую скорость передачи данных. В отличие от GSM-R, новая система ориентирована не только на обеспечение голосовой связи и передачу сигналов

управления движением поездов, но и на поддержку интеллектуальных сервисов мониторинга инфраструктуры, видеонаблюдения, автоматизации процессов обслуживания, интернета вещей и систем обеспечения безопасности персонала. Особое значение FRMCS имеет для реализации концепции цифровой железной дороги, в которой все объекты инфраструктуры объединяются в единую информационную среду. Это создаёт предпосылки для внедрения персональных мобильных систем предупреждения работников, функционирующих в режиме реального времени и обеспечивающих оперативное реагирование на возникновение опасных ситуаций [10].

Анализ существующих решений показывает, что в настоящее время для защиты работников железнодорожной инфраструктуры используются организационные, технические и автоматизированные методы предупреждения опасных ситуаций.

К традиционным решениям относятся визуальные и звуковые сигналы, переносные средства оповещения и выделение специальных наблюдателей, контролирующих приближение поездов. Однако эффективность таких методов во многом зависит от человеческого фактора и условий окружающей среды. Более современным направлением являются автоматические системы предупреждения путевых работников (ATWS), использующие датчики обнаружения поездов, беспроводные каналы передачи данных и персональные устройства оповещения. Такие системы позволяют автоматически формировать предупреждения и передавать их непосредственно работникам, находящимся в опасной зоне.

Материалы и методы исследования

Основной задачей системы является своевременное информирование персонала о возникновении потенциально опасных событий и снижение вероятности травматизма при выполнении работ на железнодорожной инфраструктуре.

В состав системы входят следующие основные элементы: диспетчерский сервер мониторинга безопасности; мобильные терминалы работников; модуль определения местоположения (GPS/ГЛОНАСС); базовая станция сети GSM-R, LTE-R или FRMCS; база данных технологических процессов; модуль оценки риска и принятия решений. Система осуществляет непрерывный сбор данных о местоположении работников, параметрах движения поездов, характеристиках выполняемых работ и внешних условиях. На основании полученной информации рассчитывается уровень риска и формируются предупреждающие сообщения, передаваемые на мобильные устройства персонала. Структурная схема предлагаемой системы представлена на рисунке 1.

В соответствии с концепцией ALARP риск рассматривается как функция вероятности возникновения опасного события и тяжести его последствий. Базовая оценка риска определяется выражением:

$$R = P \cdot C,$$

где R – уровень риска; P– вероятность возникновения опасного события; C – тяжесть возможных последствий [1].

Полученное значение сравнивается с установленными пороговыми уровнями риска: допустимый риск; зона ALARP; недопустимый риск.

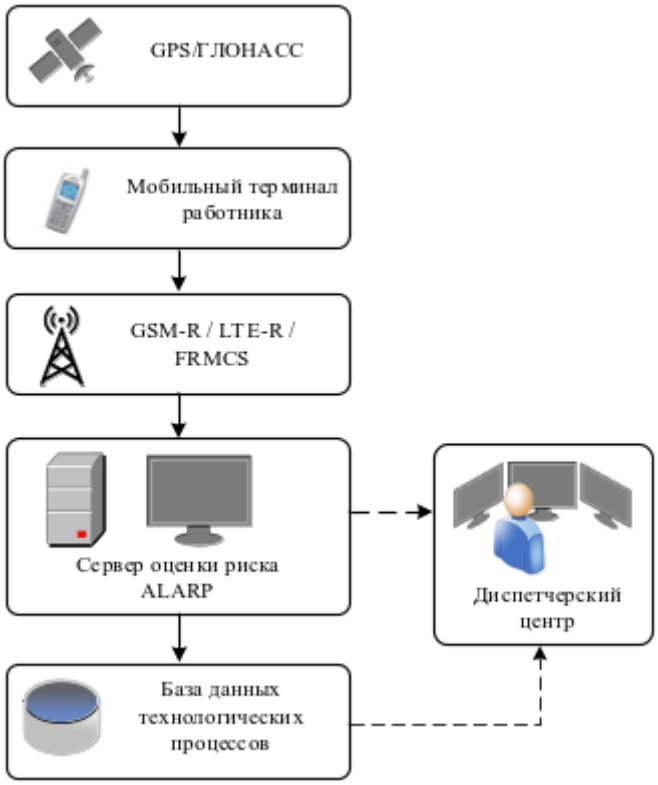


Рисунок 1. Структурная схема системы мобильного оповещения работников железнодорожного транспорта

Если рассчитанный риск попадает в зону ALARP, система анализирует возможность внедрения дополнительных технических мероприятий по его снижению. Однако для железнодорожного транспорта вероятность возникновения опасного события зависит не только от внешних факторов, но и от особенностей выполняемого технологического процесса. Поэтому в работе предлагается дополнительно учитывать коэффициент влияния технологического процесса. Для количественной оценки воздействия технологического процесса на безопасность вводится коэффициент влияния технологического процесса $K_{\text{ТП}}$. Данный коэффициент характеризует степень отклонения параметров выполняемого технологического процесса от нормативных значений и определяется выражением:

$$K_{\text{ТП}} = \frac{\Delta X}{X_{\text{норм}}},$$

где $K_{\text{ТП}}$ – коэффициент влияния технологического процесса; ΔX - абсолютное отклонение контролируемого параметра от нормативного значения; $X_{\text{норм}}$ –нормативное значение параметра [3].

В качестве контролируемых параметров могут использоваться: время нахождения работника в опасной зоне; расстояние до движущегося подвижного состава; количество работников на участке; уровень радиосвязи; соблюдение требований технологического регламента.

При полном соответствии технологического процесса нормативным требованиям коэффициент стремится к нулю: $K_{\text{ТП}} \to 0$. Увеличение отклонений приводит к росту значения коэффициента и, соответственно, к повышению уровня риска. Для учёта особенностей технологического процесса предлагается использовать интегральный показатель риска:

$$R_{ALARP} = w_1 P + w_2 C + w_3 K_{\text{ТП}},$$

где R_{ALARP} – интегральный показатель риска; P – вероятность опасного события; C – тяжесть последствий; $K_{\text{ТП}}$ – коэффициент влияния технологического процесса; w_1, w_2, w_3 – весовые коэффициенты.

Весовые коэффициенты удовлетворяют условию:

$$w_1 + w_2 + w_3 = 1 \quad .$$

Предлагаемая модель позволяет учитывать не только вероятность и последствия опасного события, но и влияние конкретных условий выполнения работ [9].

Работа системы мобильного оповещения осуществляется в следующей последовательности (рис. 2):

1. Получение координат работников и поездов.
2. Сбор данных о параметрах технологического процесса.
3. Расчёт коэффициента $K_{\text{ТП}}$.
4. Определение вероятности опасного события P.
5. Оценка тяжести возможных последствий C.
6. Расчёт интегрального показателя риска R_{ALARP}.
7. Сравнение полученного значения с установленными порогами безопасности.
8. Формирование предупреждающего сообщения.
9. Передача уведомления на мобильные терминалы работников и диспетчера [4].

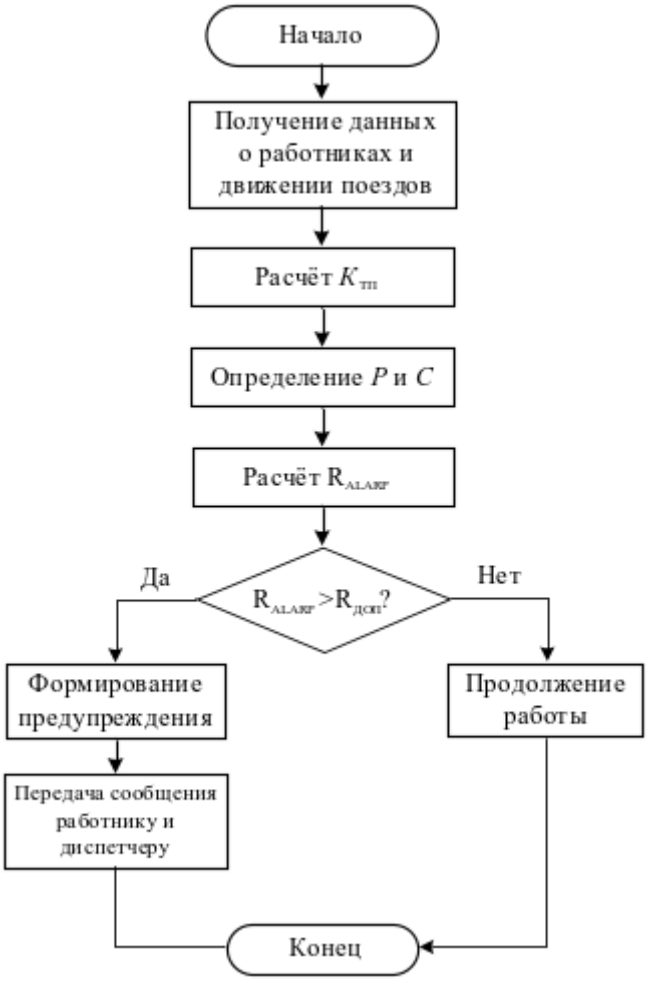


Рисунок 2. Алгоритм оценки риска на основе принципа ALARP

Результаты моделирования и обсуждение

Для оценки эффективности предлагаемой системы мобильного оповещения было проведено моделирование условий выполнения путевых работ на железнодорожном участке. В качестве исходных данных рассматривались следующие факторы: вероятность возникновения опасной ситуации при выполнении работ на пути; тяжесть возможных последствий; отклонения параметров технологического процесса от нормативных значений; наличие или отсутствие системы мобильного оповещения.

В качестве примера рассмотрим выполнение ремонтных работ вблизи действующего железнодорожного пути. Нормативное время нахождения работника в опасной зоне составляет: $X_{норм} = 10$ мин. Фактическое время выполнения работ: $X_{факт} = 14$ мин. Тогда отклонение от нормативного значения составит: $\Delta X = X_{факт} - X_{норм} = 14 - 10 = 4$. Коэффициент влияния технологического процесса определяется: $K_{ТП} = \frac{\Delta X}{X_{норм}} = \frac{4}{10} = 0,4$. Полученное значение показывают о наличии отклонений технологического процесса, способных увеличить уровень производственного риска [5].

Для проведения расчётов примем следующие значения параметров: $P = 0,35$, $C = 0,80$, $K_{ТП} = 0,40$, $w_1 = 0,4$, $w_2 = 0,4$, $w_3 = 0,2$. Интегральный показатель риска составит: $R_{ALARP} = 0,4 \cdot 0,35 + 0,4 \cdot 0,80 + 0,2 \cdot 0,40 = 0,54$. Полученное значение соответствует зоне ALARP и требует реализации дополнительных мер по снижению риска.

После внедрения мобильной системы оповещения вероятность опасного события уменьшается: $P = 0,15$. Тогда $R_{ALARP} = 0,4 \cdot 0,15 + 0,4 \cdot 0,80 + 0,2 \cdot 0,40 = 0,46$. Применение системы позволяет перевести риск в область допустимых значений. Все значения представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. Классификация уровней риска

Значение риска	Уровень риска	Необходимые действия
0–0,30	Допустимый	Дополнительные меры не требуются
0,31–0,60	Зона ALARP	Необходимо снижение риска
Более 0,60	Недопустимый	Выполнение работ запрещается

Таблица 2. Результаты оценки риска

Показатель	Без системы	С системой
Вероятность события P	0,35	0,15
Тяжесть последствий C	0,80	0,80
Коэффициент КТП	0,40	0,40
Интегральный риск RALARP	0,54	0,46

Относительное снижение риска определяется выражением:

$$E = \frac{R_{\text{до}} - R_{\text{после}}}{R_{\text{до}}} \cdot 100\% = \frac{0,54 - 0,46}{0,54} \cdot 100\% = 14,8\%.$$

Следовательно, использование предлагаемой системы мобильного оповещения обеспечивает снижение интегрального уровня риска приблизительно на 15 %. При увеличении числа контролируемых параметров и использовании технологий LTE-R или FRMCS эффективность системы может быть ещё выше за счёт уменьшения времени доставки предупреждений и повышения точности определения местоположения работников [2].

Заключение

В работе рассмотрены возможности применения принципа ALARP для повышения безопасности работников железнодорожного транспорта с использованием современных технологий мобильной связи. Проведён анализ существующих подходов к обеспечению безопасности путевого персонала, а также исследованы возможности использования железнодорожных систем связи GSM-R, LTE-R и перспективной технологии FRMCS для организации оперативного обмена информацией между работниками и диспетчерскими центрами.

Предложена концепция мобильной системы оповещения работников железнодорожного транспорта, основанная на непрерывном мониторинге производственной обстановки и динамической оценке риска. В отличие от традиционных методов предупреждения опасных ситуаций, предлагаемое решение предусматривает автоматизированный анализ параметров выполняемого технологического процесса, определение уровня риска и передачу

предупреждающих сообщений непосредственно на мобильные терминалы персонала. Для учёта особенностей выполнения работ введён коэффициент влияния технологического процесса, позволяющий количественно оценивать отклонение контролируемых параметров от нормативных значений. На основе принципа ALARP разработана интегральная модель риска, учитывающая вероятность возникновения опасного события, тяжесть его последствий и влияние технологического процесса на уровень безопасности. Результаты моделирования показали, что использование предлагаемой системы мобильного оповещения позволяет снизить интегральный показатель риска примерно на 15 % по сравнению с традиционной организацией работ. Полученные результаты подтверждают эффективность применения риск-ориентированного подхода и современных мобильных технологий связи для предупреждения происшествий на железнодорожном транспорте.

Список литературы

1. 3GPP. Use of 3GPP Technologies by Railways. Release 19. – Sophia Antipolis: 3GPP, 2024.
2. Capgemini Engineering. Future Railway Mobile Communication Systems: Position Paper. – Paris: Capgemini Engineering, 2023. – 28 P.
3. Daw S., Grace D., Taylor D. Migrating from GSM-R to FRMCS // Rail Engineer. – 2023. – № 206. – P. 34–41.
4. EN 50126-1:2017+A1:2021. Railway Applications – The Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS). Part 1: Generic RAMS Process. – Brussels: CENELEC, 2021.
5. EN 50126-2:2017+A1:2021. Railway Applications – The Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS). Part 2: Systems Approach to Safety. – Brussels: CENELEC, 2021.
6. Ferrari A. ter Beek M.H. Formal Methods in Railways: A Systematic Mapping Study // ACM Computing Surveys. – 2022. – T. 55, № 4. – P. 1–37. – DOI: 10.1145/3520480.
7. Habib A., El Falou A., Langlais C., Berbineau M. Reconfigurable Intelligent Surface Assisted Railway Communications: A Survey // IEEE 97th Vehicular Technology Conference (VTC2023-Spring). – 2023. – DOI: 10.48550/arXiv.2307.04438.
8. Hu J., Liu G., Li Y., Ma Z., Wang W., Liang C., Yu F.R., Fan P. Off-Network Communications for Future Railway Mobile Communication Systems: Challenges and Opportunities // IEEE Communications Magazine. – 2022. – T. 60, № 10. – P. 64–70. – DOI: 10.1109/MCOM.001.2101081.
9. IEC 62278-2:2025. Railway Applications – Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS). Part 2: Systems Approach to Safety. – Geneva: IEC, 2025.
10. International Union of Railways (UIC). FRMCS – Future Railway Mobile Communication System. – Paris: UIC, 2023.
11. Liu C., He R., Niu Y., Han Z., Gao M., Ma Z., Wang G., Zhong Z. Reconfigurable Intelligent Surface Assisted High-Speed Train Communications: Coverage Performance Analysis and Placement Optimization // IEEE Access. – 2024. – DOI: 10.48550/arXiv.2310.12429.

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Статья поступила в редакцию: 10.10.2026
Статья принята к публикации: 18.10.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 623.442.58:519.224.2

Лестничный тест Крейтона Одетта: теоретический анализ и рекомендации

Жуков Игорь Геннадьевич
двукратный чемпион Европы по бенчресту
Российская Федерация, г. Новосибирск
E-mail: vnbog@mail.ru

Creighton Audette’S Ladder test: a theoretical analysis and recommendations

Zhukov Igor
Two-time European Champion in benchrest
Russian Federation, Novosibirsk

Аннотация

Впервые проведен теоретический анализ лестничного теста Крейтона Одетта, целью которого являлось выявление реальной вероятности успеха. Методология исследования состояла в статистических испытаниях теста в широком диапазоне параметров в предположении различных моделей их изменения. Главный вывод: эффективность теста полностью зависит от того, действительно ли в зоне кучной навески сближаются центры попаданий соседних навесок. Если центры попаданий сближаются, то вероятность того, что кластер укажет на кучную навеску, растет с увеличением кучности винтовки и дистанции. Если центры расположены на равных расстояниях друг от друга, зависимость обратная – вероятность растет с уменьшением кучности и дистанции, а кластер укажет на самую кучную навеску с низкой вероятностью. Для примера она составляет 19,44 % для двумерного кластера и только 13,08 % для вертикали. Если считать успехом ошибку в один шаг, вероятность возрастает до 54,4 %. Это означает, что метод с высокой вероятностью укажет не на лучшую навеску, а на соседнюю или даже удалённую область. Метод дает слабую статистику и имеет значительные ограничения. Он может работать для очень кучной винтовки, на достаточной дистанции, при реальном сближении центров попаданий в зоне кучной навески и при большом отличии кучной навески от не кучных. В других случаях применение метода как самостоятельного инструмента выбора навески практически не оправдано. Статья будет полезна исследователям спортивного стрелкового оружия,

Библиографическое описание: Жуков И.Г. Лестничный тест Крейтона Одетта: теоретический анализ и рекомендации // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23585

спортсменам-стрелкам и всем любителям высокоточной стрельбы из нарезного оружия. Работа выполнена в интересах мирового спортивного стрелкового сообщества по инициативе авторов и на их собственные средства, с использованием открытых источников информации.

Abstract

This study presents the first theoretical analysis of Creighton Audette's ladder test, aimed at determining its actual probability of success. The research methodology involved statistical simulations of the test across a wide range of parameter values, assuming different models of parameter variation.

The main finding is that the test's effectiveness depends entirely on whether the centers of impact associated with adjacent charge weights converge in the region of the charge weight yielding the best precision. If these centers converge, the probability that the cluster identifies the best-performing charge weight increases with rifle precision and shooting distance. If the centers are equally spaced, the relationship is reversed: the probability increases as rifle precision and shooting distance decrease, but the smallest cluster has a low probability of identifying the charge weight that produces the tightest groups. In the example considered, this probability is 19.44 % for a two-dimensional cluster and only 13.08 % for its vertical projection. If selection within one charge-weight step of the optimum is counted as a success, the probability rises to 54.4 %. This means that the method is likely to identify a neighboring or even more distant region rather than the best charge weight. The method provides weak statistical evidence and has substantial limitations. It may be effective with a highly precise rifle at a sufficient shooting distance, provided that the centers of impact genuinely converge in the region of the best-performing charge weight and that this charge weight produces substantially less dispersion than the poorer-performing alternatives. In other circumstances, using the method as a stand-alone tool for selecting a charge weight is not justified in practice. The article will be useful to researchers studying sporting firearms, competitive shooters, and all enthusiasts of precision rifle shooting.

The study was undertaken on the authors' initiative and funded entirely by them for the benefit of the global shooting sports community, using publicly available information.

Ключевые слова: лестничный тест Крейтона Одетта, настройка спортивной винтовки, кучная полка, статистическое моделирование, экстремальный размер группы, кластер, доверительный интервал.

Keywords: Creighton Audette ladder test, target-rifle tuning, precision node, statistical simulation, extreme spread, cluster, confidence interval.

Введение

«Лестничный тест» Крейтона Одетта (Creighton Audette) — метод предварительного поиска диапазона навесок пороха, в котором положение пробоин на мишени сравнительно с другими пробоинами мало изменяется при последовательном увеличении навески. Сам Audette называл этот подход методом последовательного изменения навески; позднее за ним закрепилось название «лестничный тест» [3-5]. Метод известен под несколькими названиями: Incremental Load Development Method, сокращённо ILDM, Audette Ladder Test,

Ladder Test, а также 20 Round String Method [1]. Ему посвящено несколько работ [1, 3–8]. Но, кроме работы [1], ни в одной из них не встретилось теоретического анализа закономерностей и ограничений теста, основанного на доказательной статистике. Оригинальные статьи Крейтона Одетта в настоящее время труднодоступны. В открытых источниках обычно ссылаются на подробный разбор Randolph Constantine, опубликованный в *Precision Shooting Annual* в 1997 году и на обзор метода в *Precision Shooting Reloading Guide* 1998 года [4, 5] и в последующих практических публикациях [6–8]. В описании Rick Moritz указано, что Audette обычно заряжал серию различных навесок; шаг навески был малым, например 0,2–0,3 gr, а превышать опубликованные максимумы не следовало [6]. Audette предлагал искать не готовую “самую кучную навеску”, а кандидата на кучную полку — диапазон соседних навесок, где положение пробоин меняется минимально [4, 6]. Задача теста, по мнению автора, состоит в том, чтобы с минимальным расходом патронов в широком диапазоне навесок выделить более узкую перспективную область для последующего полноценного испытания группами. При этом в первую очередь смотрят вертикаль, а затем выбранную область проверяют дальше [7]. На короткой дистанции тест может дать красивую, но малоинформативную картину [7]. В статье Sporting Shooter указано, что Audette рекомендовал использовать дистанции порядка 200–300 м, если винтовка достаточно точна для выявления тренда [8]. Dave Affleck пишет, что 300 yards он считает минимальной дистанцией для эффективного применения метода, поскольку на 100 yards хорошая группа может не дать достаточной информации о вертикали [7]. Precision Rifle Blog указывает, что для benchrest-уровня метод работает хорошо, но для менее точных винтовок собственная дисперсия может перекрыть полезный сигнал [3]. В классическом варианте используется по одному выстрелу на каждую навеску, причём все выстрелы выполняются в одну и ту же точку прицеливания [3].

Цель статьи – провести теоретический анализ вероятности успеха теста в зависимости от значений его параметров и выявить основные закономерности и оптимальные диапазоны их изменения, а также дать практические рекомендации применения метода.

Материалы и методы

Математическая постановка задачи. На плоскости на одной вертикальной прямой *y* расположены 11 неподвижных центров попаданий C_1, …, C_{11}. Расстояние между соседними центрами задается функцией *y(h)*. Оно может быть одинаково или изменяться по заданному закону. Начало координат находится в центре C_6. В одной реализации вокруг каждого центра C_i генерируется ровно одна случайная точка R_i. Всего получаются 11 точек R_1, …, R_{11}. Координаты точек вокруг каждого центра имеют круговое двумерное нормальное распределение со стандартным отклонением σ_i. Расстояние точки от собственного центра при этом имеет распределение Рэлея с параметром σ_i. Значения h и σ_i выражены в одинаковых единицах длины. Каждая точка сохраняет номер породившего её центра независимо от своего фактического положения. После генерации точки не перенумеровываются. Рассматриваются девять перекрывающихся троек T_1-T_9 с последовательными номерами:T_1-(R_1, R_2, R_3); T_2-(R_2, R_3, R_4); T_3-(R_3, R_4, R_5); T_4-(R_4, R_5, R_6); T_5-(R_5, R_6, R_7); T_6-(R_6, R_7, R_8); T_7-(R_7, R_8, R_9); T_8-(R_8, R_9, R_{10}); T_9-(R_9, R_{10}, R_{11}). Во всех девяти тройках используются одни и те

же одиннадцать сгенерированных точек. Например, точка R_4 имеет одинаковые координаты в тройках T_2, T_3 и T_4. При формировании следующей тройки новые точки не генерируются. Для каждой пары точек определяется евклидово расстояние. Диаметр тройки — максимальное из всех трёх попарных расстояний. Среди девяти троек выбирается тройка с наименьшим диаметром: $D_{min} = \min (D_1; D_2; D_3; D_4; D_5; D_6; D_7; D_8; D_9)$. Если минимальный диаметр одновременно имеют *b* троек, одна из них выбирается случайно, причём каждая имеет вероятность выбора *1/b*. **Требуется определить вероятность P_6 того, что выбранной окажется именно тройка $T_5 = (R_5, R_6, R_7)$, соответствующая самой кучной навеске C_6, а также вероятности P_i того, что кластер D_i ошибочно укажет на любую другую тройку T_i как содержащую самую кучную навеску.**

То есть, у нас есть истинная зависимость кучности от навески, и мы проверяем способность лестничного теста Крейтона Одетта указать на самую кучную навеску, которая нам заранее известна. Поскольку задача не имеет аналитического решения, вероятности P рассчитывались методом Монте-Карло [12] по множеству независимых реализаций всей описанной процедуры.

Чтобы избежать излишне абстрактного анализа, в качестве примера взята спортивная винтовка в калибре 6.5x47 Lapua с гильзой Lapua, порохом VihtaVuori №150, пулей Berger 130 gr VLD и капсюлем Federal Gold GM210M. Диапазон навесок выбран 35,4–38,5 gr, он разделен на 10 равных частей с шагом 0,3 gr и имеет 11 значений, пронумерованных от 1 до 11 (35,4, 35,7, 36,0, 36,3, 36,7, 37,0, 37,3, 37,6, 37,9, 38,2, 38,5). На дистанции 300 метров условно расположено соответствующее этим навескам 11 центров попадания. Отметим, что на практике истинные центры попаданий неизвестны. Обозначим кучность не настроенной винтовки Бmax, а кучность настроенной – Бmin. Обозначим их отношение как n: n = Бmax/Бmin. Значение n колеблется в очень широком диапазоне от 2 до 10, но чаще всего при настройке только по навеске оно составляет не более 2–3. Угловая кучность в MOA представлена параболической зависимостью f = Б(m), где m – масса навески. Безразмерный параболический профиль задан формулой $\sigma_i/\sigma_6 = 1 + (n - 1)\cdot((i - 6)/5)^2$. Отношения кучности в конкретном примере равно: $\sigma_i/\sigma_6 \approx$ (3; 2,4; 1,8; 1,34; 1,1; 1; 1,1; 1,34; 1,8; 2,4; 3). Минимальный размер Бmin, соответствующий самой кучной навеске, задан исходя из размера группы, примерно равной ES5 = 0,15 MOA, максимальный – 0,45 MOA. Линейный размер Б в мм на дистанции 300 м, рассчитанный из угловой в MOA, представлен зависимостью y = 0,35x2 – 4,17x + 17. Отношение n = Бmax/Бmin максимального и минимального Б равно: n6 = 13,1/4,36 ≈ 3. На практике возможны любые варианты функции f(m), в том числе с несколькими полками, и любые варианты n в пределах n = 2–10.

Для выбранного диапазона навесок 35,4–38,5 gr с шагом 0,3 gr по программе GordonReloadingTools GRT [11] рассчитан диапазон скорости пули 819,4–878,5 м/с. По ним для дистанции 300 м с помощью баллистического калькулятора рассчитан диапазон поправок 3,17–3,94 MOA и линейные координаты центров попадания для всего диапазона навесок. Разница между верхним и нижним центрами попадания составила примерно 70 мм.

Вначале решим задачу с равным шагом h между центрами попаданий при равном шаге 0,3 gr по навескам, и затем с переменным h. Шаг h примем равным 7 мм. Отношение $k=Б_6/h$ для конкретного примера равно k =0,623. Обозначим линейный разброс точек попадания Б,

и введем коэффициент k=Б/h. Тогда с ростом дистанции при постоянном угловом значении Б величина k будет уменьшаться, поскольку угловое значение h растет, а с уменьшением дистанции будет увеличиваться.

Для решения задачи необходим критерий кучной полки. В описании ILDM прямо говорится, что ищется cluster of shots, где elevation impact последовательных выстрелов почти одинаков [6]. Dave Affleck формулирует ещё точнее: в тесте действительно видны группы пробоин, но в первую очередь смотрят вертикаль; если условия очень хорошие, можно увидеть и горизонтальную составляющую [7]. Sporting Shooter также описывает оба признака: размер группы и вертикальный разброс [8]. В описании метода часто встречается, что горизонтальное рассеивание сильнее загрязняется боковым ветром и другими случайными факторами [6–8]. Поэтому рассмотрим и двухмерный кластер, и его вертикальную проекцию, а также их связь.

Результаты и обсуждение

Решение задачи при заданном профиле функции f = Б(m) и постоянном шаге h зависит от двух безразмерных переменных: $k = Б_{min}/h$ и $n = Б_{max}/ Б_{min}$. Для конкретных значений (h = 7, $Б_{min}$ = 4,36, k = 0,623, n = 3) вероятность P_6 того, что кластер из 3 пробоин укажет на самую кучную навеску, оказалась довольно мала, P_6 = 19,44 %, несмотря на то что отношение $n = Б_{max}/ Б_{min}$ выбрано большое.

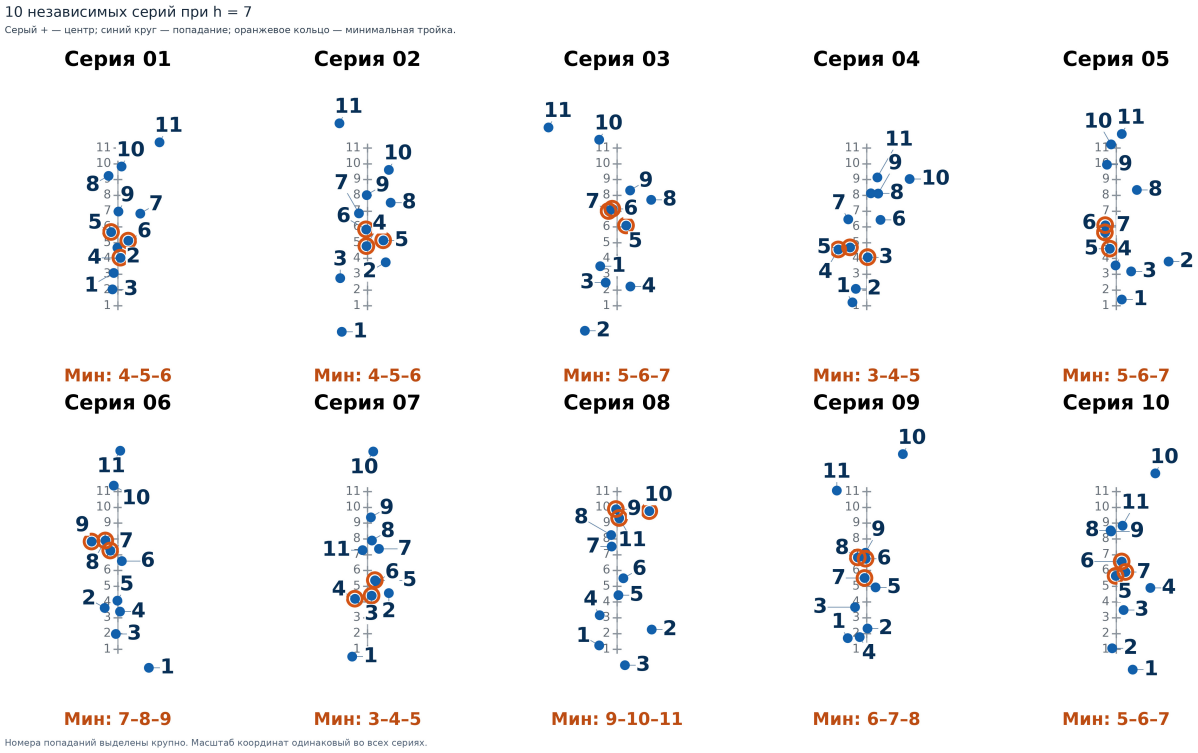


Рисунок 1. 10 серий по 11 выстрелов (один выстрел на 1 навеску)

Диаграммы на рис. 1 демонстрируют, как могут проходить тесты на практике. Метод подразумевает один тест, но мы смоделировали 10 серий. Минимальная группа, указывающая на самую кучную полку, должна быть с номерами 5-6-7. Получены фактические результаты по порядку: 4-5-6, 4-5-6, 5-6-7, 3-4-5, 5-6-7, 7-8-9, 3-4-5, 9-10-11,

6-7-8, 5-6-7. Из 10 серий 3 правильно указали расположение кучной навески, и это выше, чем среднее по множеству опытов (19,44 %), еще 3 серии показали на точки рядом с самой кучной. В сумме 6 точек из 10 указали на самую кучную навеску и соседние с ней, то есть, суммарная вероятность 60 %. Здесь нет никакого противоречия, это просто случайные значения при ограниченной выборке. Одна серия (9-10-11) указала на худшую точку как самую кучную.

На рис. 2 приведена диаграмма вероятности того, на какую навеску укажет минимальный кластер как на самую кучную для всех девяти троек. Вероятность P_6 (в нашем случае это навеска 37,0 gr), как уже было показано, равна 19,44 %. С ошибкой в один шаг от самой кучной навески кластер укажет как на самую кучную с вероятностью 54,4 %, с ошибкой в два шага с вероятностью 79,5 %.

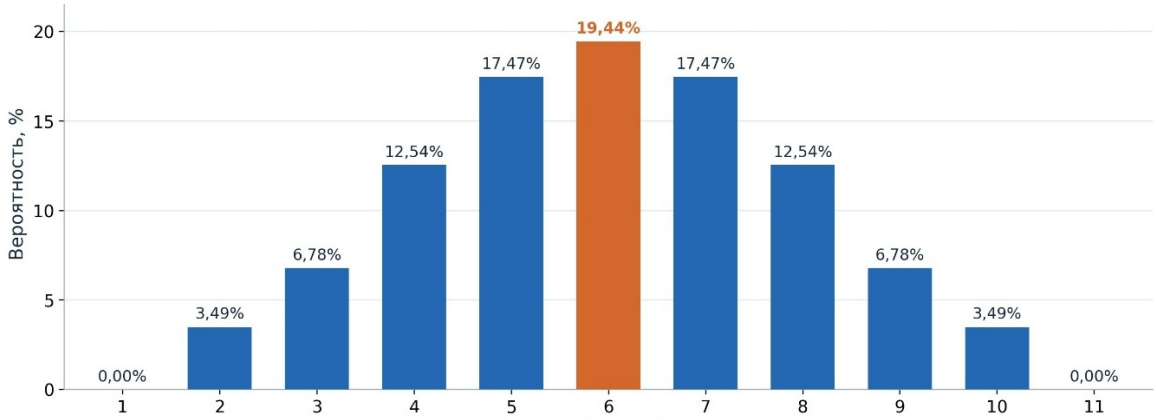


Рисунок 2. Зависимость вероятностей P_i для всех кластеров

Эти данные рассчитаны для n = $Б_{max}/Б_{min}$ = 3, и при другом соотношении n вероятности изменятся в большую или меньшую сторону (рис. 3).

На рис. 4а представлен график точности, с которой по результатам серий опытов можно оценить вероятность P_6 — долю серий, в которых самой компактной оказалась тройка 5–6–7. Он отвечает на вопрос: сколько серий нужно провести, чтобы по их результатам можно было что-то утверждать с высокой достоверностью.

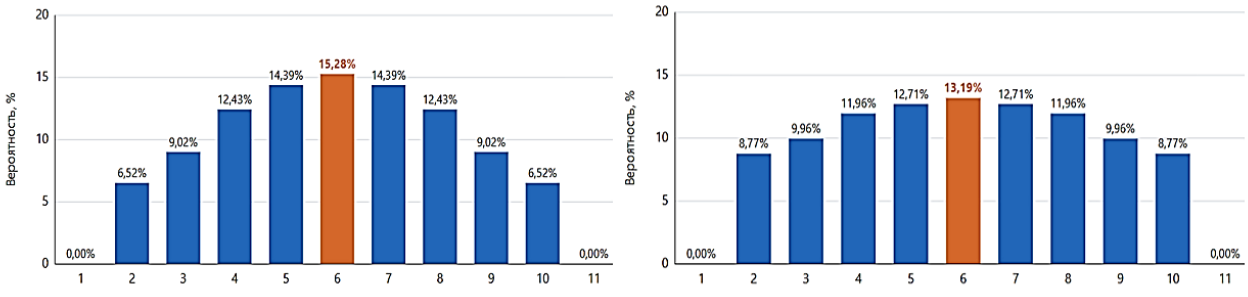


Рисунок 3. Диаграммы для n = 1,5 и n = 2

Видно, что точность растет медленно, как 1/√p. Для числа серий 3 доверительный интервал с доверительной вероятностью 95 % очень широк – 0,038–0,746 и точность низкая. Полуширина интервала составляет +/- 0,493, почти 50 %. Для вероятности 80 % он тоже широк. Даже для 10000 серий доверительный интервал все еще заметен. Поэтому для обеспечения высокой точности, превышающей шумы, делались миллионы серий.

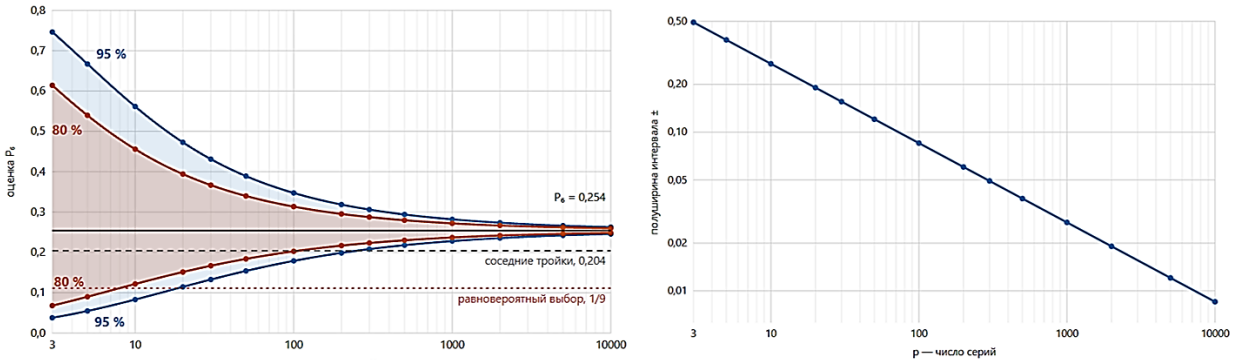


Рисунок 4. 95 % и 80 % доверительные интервалы оценки P_6 и полуширина интервала в зависимости от числа серий p

Расширим диапазон параметров k и n, и исследуем весь их интервал. При фиксированном n рассчитаем влияние параметра k на вероятность того, что обнаруженный кластер действительно соответствует навеске C_6.

Решение приведено на графике рис. 5. Применена логарифмическая шкала, значение k задано в диапазоне 0,001 ≤ k ≤ 100. Сравнили девять последовательных троек: 1–2–3, 2–3–4, …, 9–10–11. Диаметр D_i каждой тройки определили как наибольшее из трёх попарных расстояний. Вероятность того, что кластер укажет на самую кучную навеску, получили как средний вес победы тройки 5–6–7 по всем опытам. Объём моделирования составил 10 млн опытов на каждое значение k на основной сетке, и 30 млн — в ключевых точках, включая данные при $k = Б_6/h = 0,623$.

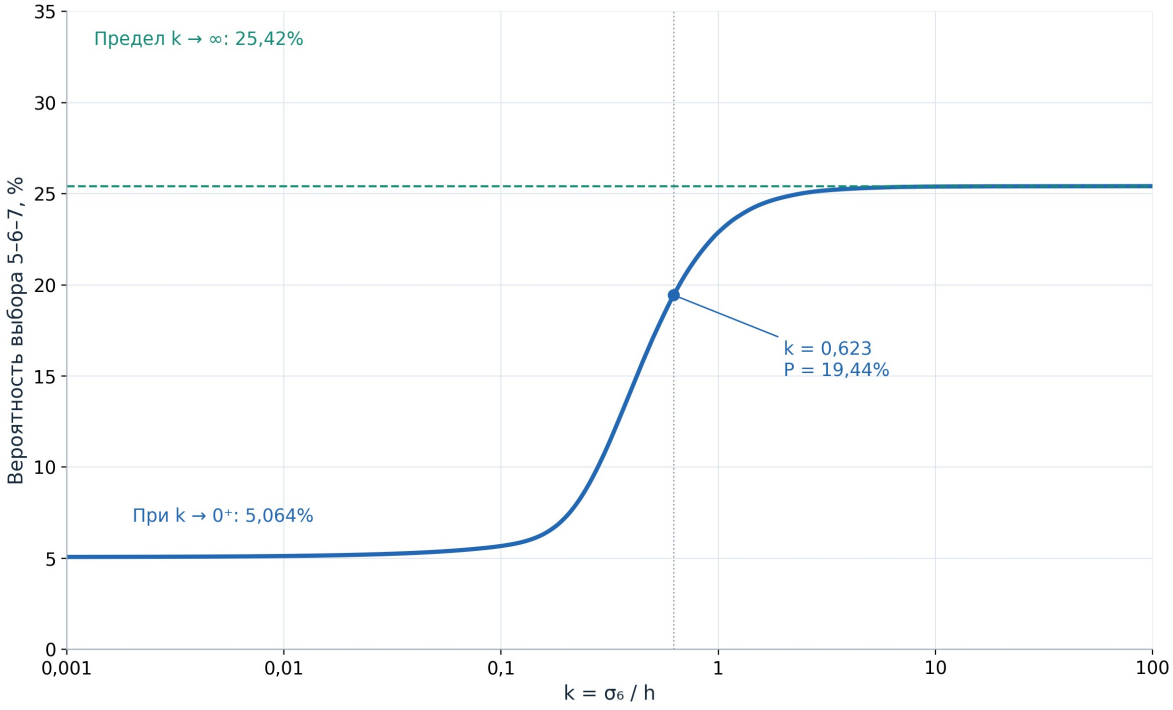


Рисунок 5. Зависимость P_6 от k

Погрешность оценки вероятности P при доверительной вероятности 95 % — не более ±0,03 процентного пункта на основной сетке. При k = 4,36335/7 = 0,623336 получено: P_6 = 19,441 % ± 0,014 процентного пункта**,** то есть 95 %-й доверительный интервал — 19,427–

19,455 %**.** Главной неожиданностью стал вывод о том, что при равных шагах между центрами попаданий h вероятность P_6 растет с увеличением значений параметра k. Практически это означает, что для заданной дистанции вероятность того, что кластер укажет на самую кучную навеску, растет с ростом разброса точек попадания, то есть, с уменьшением кучности. Например, при k = Б/h = 0,1 вероятность лишь немного больше 5 %, а при k = 10 она приближается к своему максимуму 25,42 %. Это противоречит общепринятому представлению, что метод лучше работает для кучных винтовок. При равном расстоянии между центрами попаданий как раз наоборот. Если значение h равно между всеми центрами попаданий, а дистанция, пуля и скорости фиксированные, то увеличение k возможно только при увеличении Б, и максимум вероятности того, что кластер укажет на самую кучную навеску, достигается при худшей кучности винтовки. Второй вывод оказался так же противоречащим общепринятым представлениям. Учитывая, что кучность изменяется линейно с изменением дистанции (угловая кучность постоянна до 300 м), а расстояние между центрами попаданий изменяется нелинейно, при уменьшении дистанции параметр k и вероятность P_6 растут, а при увеличении падают. То есть, увеличение дистанции со 100 до 300 метров, наоборот, снижает, а не увеличивает, вероятность P_6 обнаружения самой кучной навески, и следовательно, теоретически дистанция 100 метров при равном шаге h для вероятности успеха теста лучше, чем 300 метров. То есть, по теории при равном шаге h между центрами увеличение дистанции со 100 до 300 м вообще не имеет смысла: чем больше дистанция, тем меньше k и меньше вероятность того, что кластер укажет на кучную полку. Однако в описании метода заявляется именно о необходимости большей дистанции.

В каждой точке с изменением значений k вероятности P_2-P_{10} ведут себя по разному (рис. 6а). Вероятность того, что кластер T_5 покажет самую кучную навеску, минимальна при $k \to 0$ и растет с ростом k. В то же время поведение графиков на крайних, самых некучных навесках, обратно: значение вероятности максимально при $k \to 0$ и далее падает при увеличении k. Среди этих кривых есть также переходные графики, например T_3 и T_7, которые имеют максимум, в данном случае примерно при k = 0,4. Поскольку мы задали симметричный профиль f(m), то правые и левые графики от точки 6 повторяют друг друга, и всего различных кривых 5.

Во всех предыдущих расчетах параметр n был равен 3: n = 3. По нашим данным это значение соответствует верхней границе ожидаемого при настройке только по навеске. Однако можно предположить, что значение параметра $n = Б_{max}/ Б_{min}$ может быть как меньше, так и больше этого значения. Например, не настроенная винтовка может иметь размер групп ES_5 = 2 MOA, а настроиться она может и на 1 MOA, и на 0,2 MOA. Поэтому проведены расчеты вероятностей для значений n = 2–10 (рис. 6б). На каждое значение k и n использовано 10 млн опытов. Статистическая погрешность — около ±0,03 процентного пункта при доверительной вероятности 95 %.

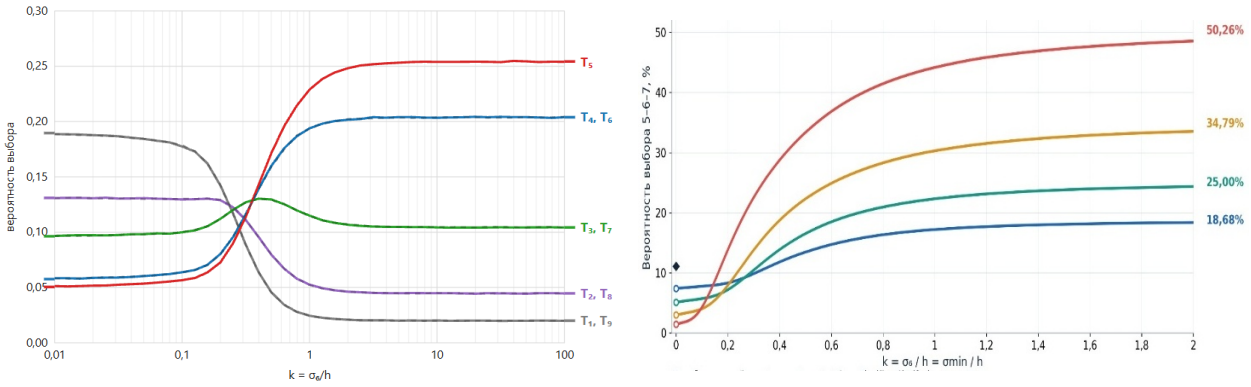


Рисунок 6. а - вероятности Р 2 -Р 9 в зависимости от k; б - зависимость Р 6 от k при различных n = 2, 3, 5, 10

На графике рис. 6б показано, как перепад сигм $n = Б_{max}/ Б_{min}$ влияет на вероятность P_6. С ростом n вероятность P_6 в целом примерно после $k \geq 0,3$ ожидаемо растет, и для $n \geq 10$ может стать более 50%. Однако, по нашему мнению, n = 10 - весьма редкий случай. В зоне $k \leq 0,3$ кривые P(k) меняются местами, но в этой зоне слишком малая вероятность, чтобы она была рабочей. Если подвести промежуточный итог, то можно считать, что вероятность того, что кластер укажет на кучную навеску при равном шаге h между центрами, будет не выше 20%, а что он укажет на соседние навески, как на кучные, включая кучную – не больше 50%. Соответственно, вероятность ошибиться в выборе кучной навески 80%, а выборе соседних как самой кучной 50%.

Далее рассмотрим связь кластера с его проекцией на вертикальную линию, соединяющую центры попадания, поскольку в методе обращают внимание именно на вертикальную составляющую. На рис. 7а приведены зависимости от k вероятности Р6 при круговом распределении пробоин и при их проекции на линию центров попаданий, а на рис. 7б – отношение вероятностей при круговом распределении и при проекции на вертикальную линию. Расчеты показали, что проекция всегда даёт вероятность ниже круговой. В сравнении с вероятностью выбора тройки по круговым кластерам она занижена во всем диапазоне k: при $k \to 0^+$ проекция дает вероятность 5,06 %, а круговое распределение 5,064 %, при k = 0,623 (h = 7, σ_6 = 4,36) эти цифры равны соответственно 13,08 % и 19,44 %, в пределе $k \to \infty$ они становятся равными 19,62 % и 25,42 %. Вероятность 13,08 % – довольно малое значение: вертикальная проекция кластера укажет на кучную точку в среднем только в 1 серии из 8. При малых k обе вероятности совпадают (0,051). Когда шаг h велик по сравнению с разбросом ($k \leq 0,1$), диаметр тройки и на плоскости определяется почти только разностью продольных координат крайних точек, поперечный разброс вклада не даёт.

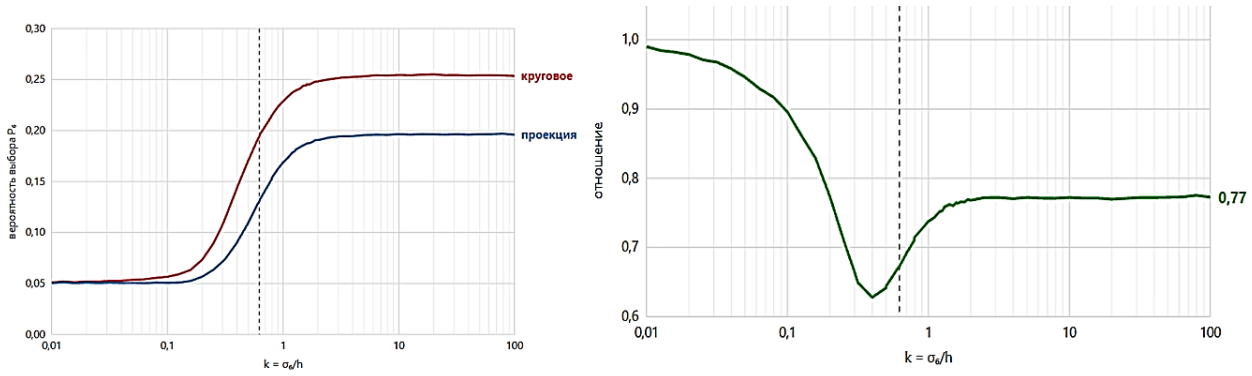


Рисунок 7. а-вероятность P 6 при круговом распределении пробоин и при их проекции на линию центров попаданий; б-отношение вероятностей при круговом распределении и при проекции на вертикальную линию

Наибольшее расхождение — в переходной зоне, k ≈ 0,3–0,5, где отношение падает до 0,64. Круговая кривая начинает расти раньше: поперечный разброс увеличивает диаметры «шумных» троек и тем самым помогает тройке с малыми σ уже при меньших k. При больших k отношение выходит на постоянное значение 0,77. Оба предела конечны (0,254 и 0,196); на плоскости разброс проявляется по двум координатам, и размер тройки точнее отражает её σ, поэтому тройка у σ_{min} выделяется увереннее. Форма обеих кривых одинакова (S-образная, с плато по краям), так что качественные выводы прежних расчётов сохраняются и для проекции, но количественно вероятность нужно умножать на коэффициент от 0,64 до 0,77 или до 1 в зависимости от k.

Понятно, что автор и исследователи метода рекомендовали в качестве критерия вертикальную проекцию из-за неконтролируемого влияния порывов бокового ветра и других факторов, оказывающих влияние только на боковой разброс точек попадания. Но в чистом виде переход от двухмерного кластера к его вертикальной проекции уменьшает вероятность того, что кластер укажет на самую кучную навеску, примерно на 30 %, и это очень существенная потеря достоверности теста.

Мы исследовали метод Одетта при одной (параболической) зависимости f = Ϭ(m). В более широком исследовании должна изменяться вся цепочка σ, а не только упрощенно σmin и отношение n = σmax/σmin при заданной функции f = Ϭ(m). Теоретически результат зависит от всех σ_i; если вместе с h меняются остальные σ, картина будет немного другой. Но расчеты показали, что все выявленные закономерности остаются при разных практически встречающихся формах зависимости f(m). Исключение — одинаковые σ, то есть, когда кучной полки не существует. При n = 1 зависимость обратная и слабая. Кривая идёт вниз, а не вверх. С ростом k вероятность слегка падает с 11,7 % до 10,65 %, всего на один процентный пункт. Напомним, что при неравных σ и n = 3 она росла с 5,06 % до 25,42 %.

Максимум вероятности при одинаковых h и неравных Ϭ не является рабочей точкой, это просто теоретически верхняя грань при k → ∞. Строго говоря, при h > 0 он не достигается, вероятность только приближается к нему снизу. В пределе k → ∞ вероятность получить тройку у точки σ_{min} ограничена сверху числом, которое зависит только от набора σ, и шаг между центрами попаданий может эту вероятность только уменьшить.

Далее рассмотрим, как на вероятность P_6 и другие вероятности P_i влияет неравномерность шага h между центрами попаданий.

Есть по крайней мере две причины, по которым шаг h может поменяться. Первая – так называемые «полки скорости», когда при росте навески скорость перестает расти и точки попадания перестают «высить». Идея скоростной полки выглядит физически правдоподобно. Давление и скорость не обязаны расти идеально линейно с линейным ростом навески, и можно допустить по каким-то причинам участки с меньшей чувствительностью скорости к навеске. Однако источники, в которых приводились таблицы и графики с полками скорости, не доказывают это большим числом параллельных выстрелов, а случайный разброс скорости при малом числе повторов легко может создать видимость полки там, где её нет. Об этом же говорил и Брайан Литц [10]. Кроме того, скоростные полки, даже в случае, если бы они существовали, не являются автоматическим доказательством кучной навески. Они лишь могли бы показывать, что в данном диапазоне скорость менее чувствительна к изменению заряда. Также существует мнение, что в зоне кучных навесок разброс (SD) скорости снижается. Однако надежных данных о том, что SD уменьшается всегда или как правило в зоне кучной полки, мы не нашли.

Вторая причина, которая может поменять расстояние между центрами попаданий – это изменение направления вылета пуль при изменении навески. Это вполне правдоподобное событие, которое легко объяснить разным положением и скоростью дульного среза в момент вылета пуль при разных навесках. В зоне кучной навески и соседних с ней при относительно неподвижном дульном срезе пули могут выходить из ствола в одинаковом направлении. Дэн Ньюберри в методе OCW исходит именно из того, что на кучной полке при изменении навески СТП могут отличаться меньше всего [9]. Свойство ствола винтовки удерживать направление вылета пуль в некотором диапазоне навесок является, возможно, ключевой идеей в применении лестничного теста Крейтона Одетта.

На рис. 8а приведена схема, которую мы далее будем исследовать. Ее суть заключается в том, что по какой-то причине (скоростная полка, SD, неподвижный дульный срез) центры попаданий в зоне самой кучной навески и соседних с ней сближаются больше, чем в остальном диапазоне навесок. На схеме рис. 8а шаг на удалении от самой кучной навески остался равен 7 мм, а сближение трех соседних центров в зоне самой кучной навески C_6 составили 6, 5, 4, 3, 2 и 1 мм. На рис. 8б приведены графики зависимости вероятности P_6 при равном шаге h (нижняя кривая) и при уменьшении шага h в зоне кучной навески до 6 и затем до 3 мм. Теперь зависимость $P_6(k)$ поменялась на обратную и, похоже, все стало на свои места, то есть, практика и теория перестали противоречить друг другу после выдвижения гипотезы об уменьшении шага. Более того, все практические постулаты метода начинают работать так, как предсказывает теория, только в случае сближения центров в зоне кучной навески и навесок, соседних с ней. Получается, что все рекомендации о применении лестничного теста (кучная винтовка, дистанция 200-300 метров, а не 100) интуитивно исходят из гипотезы сближения центров, которую еще надо доказывать экспериментами для конкретных случаев.

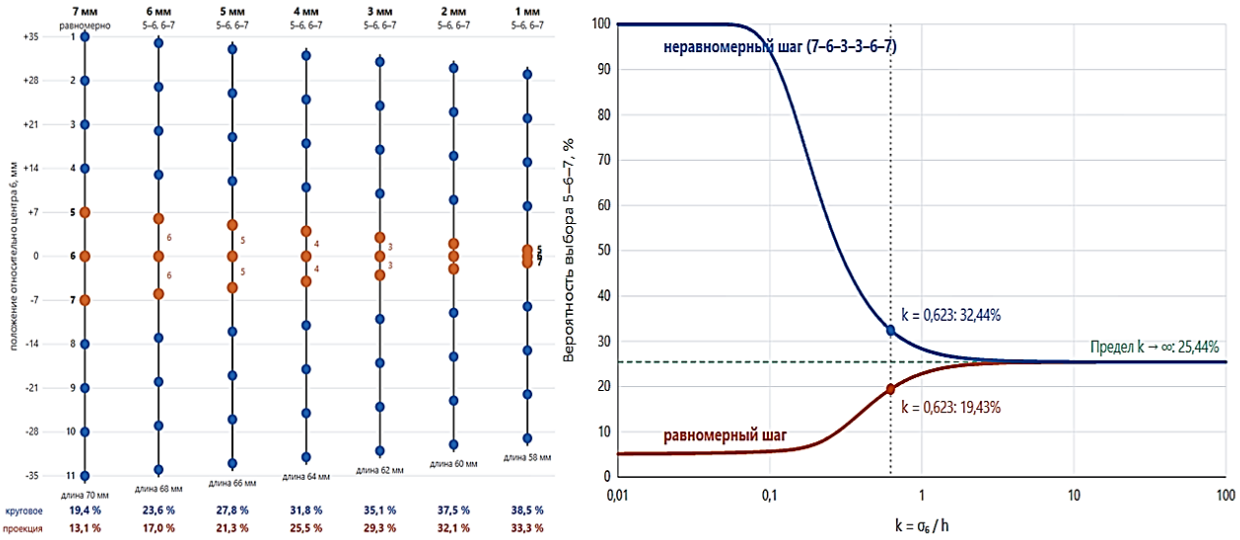


Рисунок 8. Схема сближения центров попаданий в окрестности самой кучной навески (а) и соседних с ней; зависимости $P_6(k)$ при равномерном и не равномерном шаге (б)

Вероятность P_6 в исследуемой точке выросла до 32,5%, но главное, в этой модели она не падает, а растет с уменьшением k, то есть, с повышением кучности винтовки, как и отмечал автор метода, что он лучше работает для бенчрест-винтовок. Оценим практический предел значений k. В нашем примере мы и так взяли достаточно высокую кучность ES_5 = 0,15 MOA. Если взять близкую к предельной кучность ES_5 = 0,05 MOA для винтовок 6 mm PPC, то для дистанции 300 м коэффициент k со значения 0,623 уменьшится в 3 раза, до 0,208. Одновременно, если снизить диапазон скорости пуль с 830–890 до 760–820, то h увеличится с 7 примерно до 9 мм, и k уменьшится до 0,150. Еще можно взять максимальное значение $z = h_{max}/h_{min}$ и предположить отношение $n \geq 3$. При наличии хорошей трубы или видеокамеры расстояние до мишени можно увеличить до 500 метров, тогда k можно снизить больше. При таких значениях параметров теоретически вероятность P_6 увеличится почти до 80%. Но $k \leq 0{,}150$ – это очень труднодостижимый предел, и это уже натяжки, поскольку скорость пуль бенчрест-винтовок часто более 1000 м/с, и все высокоточники стремятся увеличить скорость пули, а скорость 760–830 м/с ближе охотничьим винтовкам, например, в калибре .308 Win.

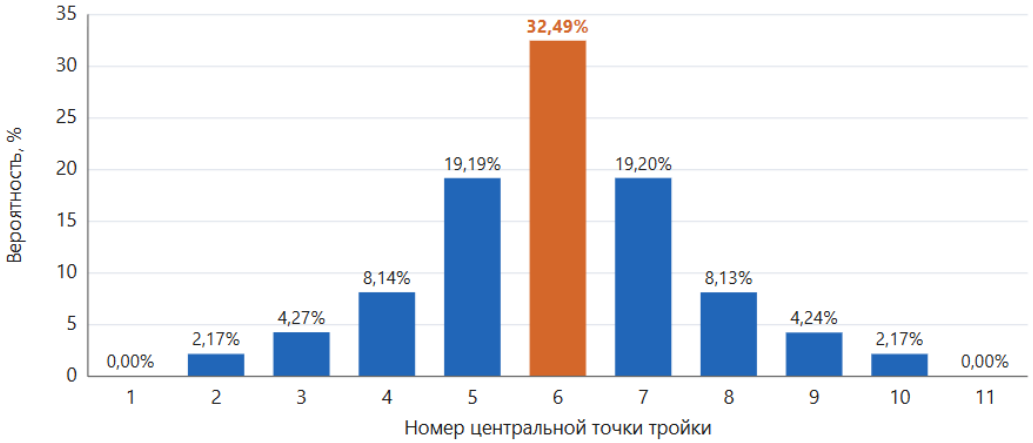


Рисунок 9. Вероятность P 6 того, что кластер укажет на самую кучную навеску (32,49%) и вероятности Pi, что кластер ошибочно укажет на другую навеску как на самую кучную

Поэтому практический предел k все же остается на уровне k ≤ 0,4-0,6, и тогда вероятность P_6 будет не выше 35 %. Вместе с соседними навесками кластер укажет на зону из 3 центров как на самую кучную навеску с вероятностью около 70 % (рис. 9).

При равном шаге между точками h = 7 мм кривая $P_6(k)$ имеет S-образный вид, как и в предыдущих расчетах. Но при малейшей неравномерности шага форма кривой резко меняется. В области малых значений k вероятность $P_6(k)$ становится равной 100%, и далее кривая неравномерного шага спускается сверху на кривую с равномерным шагом h. Таким образом, появляется третья безразмерная величина z – отношение шага между центрами z = f(h) или упрощенно $z = h_{max}/h_{min}$, которая принципиально меняет форму зависимости $P_6(k)$. Исследуем причины такого резкого изменения формы функции $P_6(k)$ в широком диапазоне уменьшения величины h в зоне кучной навески. На рис. 10а в логарифмических координатах приведены зависимости $P_6(k)$ для $h_{5\text{-}6\text{-}7}$ = 7, 6,999, 6,99, 6,95, 6,9 мм, а на рис. 10б для $h_{5\text{-}6\text{–}7}$ от 7 мм до 1 мм в зоне 5-6-7.

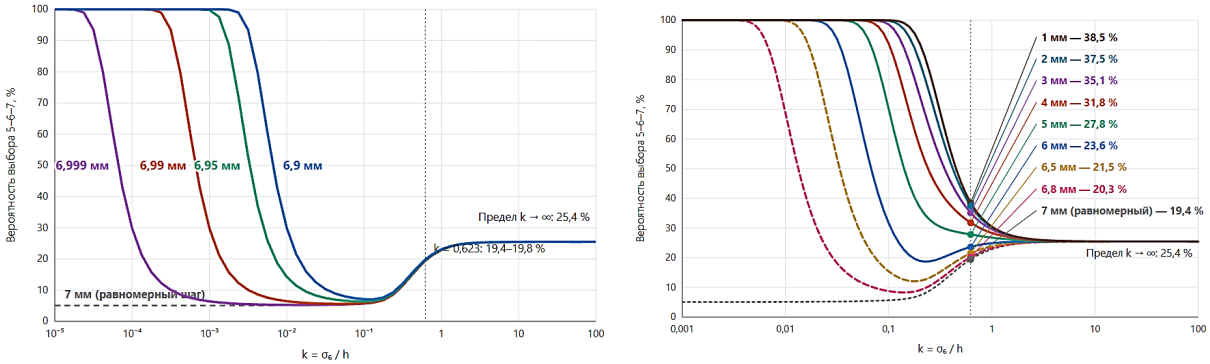


Рисунок 10. Зависимости вероятности P 6 (k) для h = 7, 6,999, 6,99, 6,95, 6,9 мм (а), и h от 7 до 1 мм в зоне навесок 5-6–7 (б)

Эффект объясняется тем, что на выбор тройки 5-6-7 или другой действуют три разных механизма, каждый со своим масштабом разброса. При равномерном шаге h первый из них отсутствует, поэтому кривая S-образная. При неравномерном эффект проявляется слева и даёт участок P = 100 %.

Первый механизм можно назвать геометрической форой. Она работает, пока σ_6 меньше сокращения промежутка $\delta = 7 - g$. При малом разбросе точки почти стоят в центрах, и диаметр тройки равен расстоянию между её крайними центрами плюс малая добавка: $D_j \approx L_j + \xi_j$, где ξ_j — разность продольных отклонений крайних точек. При равномерном шаге все $L_j = 14$ мм. При сокращённых промежутках 5–6 и 6–7 длины такие: у тройки 5–6–7 — 2g, у двух соседних — 7 + g, у остальных — 14. Центральная тройка короче соседних на δ и короче остальных на 2δ. Пока шум ξ много меньше δ, она выигрывает всегда — отсюда 100 %.

Второй механизм – отбор минимума при равных длинах (σ_6 больше δ, но много меньше h). Когда шум перекрывает фору δ, длины снова «равны» и решает только ξ. Но выбирается минимум, а минимум чаще достаётся той тройке, у которой ξ колеблется сильнее: только она способна дать большое отрицательное отклонение. У центральной тройки σ наименьшие, поэтому она оказывается самой редкой — 5,06 %, вдвое ниже равновероятных 11,1 %. Это и есть левое плато кривой равномерного шага.

Третий механизм – это поперечный разброс (σ_6 сравнимо с h). Когда разброс становится сравним с шагом, диаметр перестаёт быть «длиной вдоль линии»: поперечные отклонения только увеличивают его, причём тем сильнее, чем больше σ. Большой разброс превращается из преимущества в недостаток, и центральная тройка с малыми σ выходит вперёд — подъём составляет до 25,4 %. Кривая неравномерного шага ложится сверху на равномерную, потому что в области малых k (механизмы 1 и 2) вероятность зависит только от отношения σ_6/δ. При $\sigma_6/\delta \to \infty$ функция стремится к 5,06 % — к значению равномерного шага. Фора δ никуда не исчезает, но тонет в шуме, и расстановка становится неотличимой от равномерной. Сближение идёт сверху, потому что сокращение промежутков может только помогать центральной тройке: при любом k её вероятность не ниже, чем при равномерном шаге. Форма кривых меняется от «провала» к монотонному спаду, потому что у кривой два характерных значения k: $k_1 \approx 0{,}067 \cdot \delta$ — конец геометрической форы; $k_2 \approx 0{,}2–0{,}5$ — начало действия поперечного разброса (от δ не зависит). Пока δ мало, механизмы 1 и 3 разнесены по оси k, и между ними остаётся участок, где действует только механизм 2, — провал. С ростом δ первый участок расширяется вправо, перекрывает провал, и два перехода сливаются в один. Таким образом, кривая неравномерного шага — это кривая равномерного шага, к которой слева добавлена ступень геометрической форы. Ширина ступени пропорциональна сокращению промежутка, высота всегда 100 %. Поэтому «разрыв» между 7 мм и 6,999 мм существует только в пределе $k \to 0$: при любом конечном разбросе кривая для 6,999 мм отличается от равномерной лишь при σ_6 меньше примерно 0,002 мм.

Практический вывод: сближение центров в зоне кучной навески повышает вероятность выбора центральной тройки заметно только тогда, когда сокращение сравнимо с разбросом (δ не меньше примерно $\sigma_6/2$). При $\sigma_6 = 4{,}36$ мм это сокращение от 2 мм и больше, что и видно в рабочей точке: 19,44 % при 7 мм, 23,6 % при 6 мм, 35,2 % при 3 мм, 37, 5 при 2 мм, 38,5 при 1 мм.

Выигрыш от сближения центров при уменьшении h постепенно затухает. От 7 до 3 мм каждый миллиметр даёт около 4 пунктов, от 3 до 2 мм — 2,4 пункта, от 2 до 1 мм — 1 пункт, дальше прироста нет. Максимум около 1 мм, потом слабый спад: 38,5 % при 1 мм, 38,1 % при

0,1 мм. Разница 0,4 пункта в десять раз больше погрешности, так что это реальный эффект, а не шум. Причина насыщения: когда промежуток становится много меньше σ_6 = 4,36 мм, диаметр центральной тройки определяется уже только разбросом и перестаёт уменьшаться. Потолок вероятности P6 при этом профиле σ — около 38,5 %. Расстановкой центров поднять вероятность выше нельзя; при малом разбросе (k меньше 0,1) она и так равна 100 %.

На рис. 11 приведены зависимости вероятностей P_i при не равном шаге h для всех точек. В отличие от зависимостей на рис. 6 теоретически сильно доминирует кластер, соответствующий кучной навеске, но практически его левая часть при k ≤ 0,4–0,6 трудно достижима.

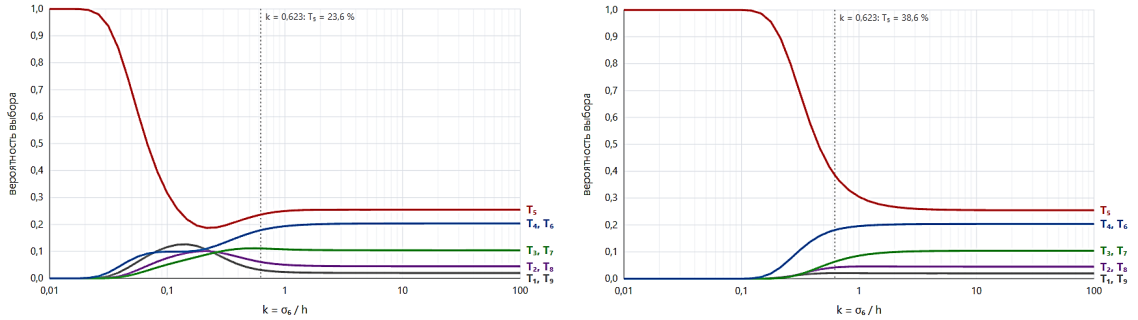


Рисунок 11. А шаг между точками 5-6 и 6-7 6 мм; б – шаг между точками 5-6 и 6-7 1 мм

Исследуем отличие вероятности P_6 для двумерного кластера и его проекции на линию центров попадания. На рис. 11 представлены зависимости $P_5(k)$ при проекциях кластера для различных значений z. Форма зависимостей повторяет форму для кругового кластера, но отношение вероятностей по-прежнему в пользу кругового кластера. Картина та же, что при круговом рассеивании: все кривые начинаются со 100 % и сходятся к общему пределу. Но этот предел ниже, 19,6 % вместо 25,4 %, и в рабочей точке проекция везде даёт примерно на 6 пунктов меньше.

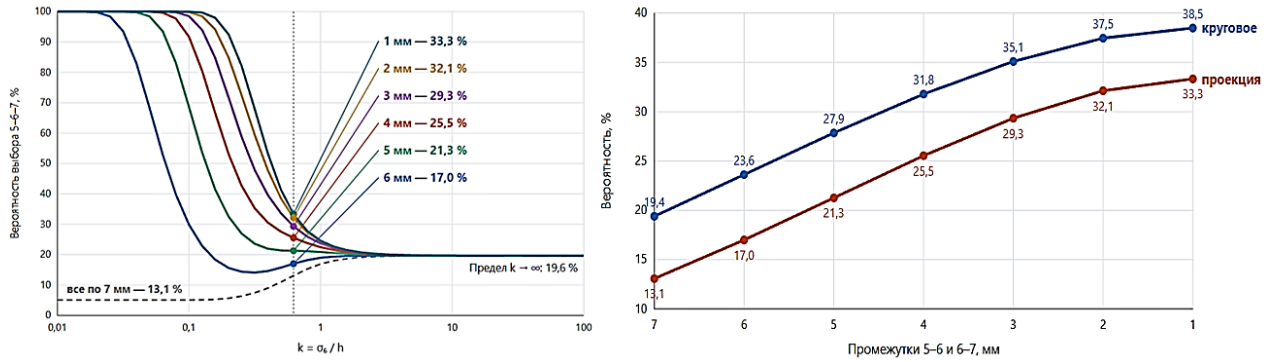


Рисунок 12. Кривые $P_6(k)$ для вертикальной проекции и сравнение проекции с круговым рассеиванием по величине промежутка

Выигрыш от сближения центров почти такой же, как при круговом рассеивании: около 4 пунктов на миллиметр в рабочей точке. Левая ступень у проекции практически совпадает с круговой. Точка 50 % для 6 мм лежит при k ≈ 0,065 против 0,067: при малом разбросе диаметр и на плоскости определяется продольными координатами, поэтому механизм геометрической форы тот же. Провал тоже на месте и глубже: у кривой 6 мм минимум 14,1 %

при k ≈ 0,3, ниже предела 19,6 %. Начиная с 5 мм кривые убывают монотонно. Справа кривые сходятся к 19,6 %, а не к 25,4 %. Поперечная координата добавляет информацию о разбросе. Без неё тройку с малыми σ выделить труднее даже при совпадающих центрах. Как и раньше, при малых k проекция и круговое рассеивание совпадают, а расходятся в переходной зоне и справа. Точность расчета: 3 млн реализаций на каждое значение k, все кривые посчитаны на одном наборе случайных точек, ±0,03 %.

Сделаем оценку различимости точек попадания на мишени. Если исходить из размера групп на кучной полке ES_5 = 0,15 MOA, что примерно соответствует Ϭ = 0,05 MOA, то на дистанциях 100, 200 и 300 метров расстояние между центрами отверстий будет равно соответственно 4,36, 8,73 и 13,09 мм. Максимальный размер групп 0,45 MOA в точках, удаленных от кучной навески, дает расстояние между пробоинами в 3 раза больше. Расстояния h между центрами на дистанции 100 метров меньше 1 мм, на 200 метров 2,25 мм, на 300 м 7 мм, на 500 м – 26 мм. В окрестности кучной полки ожидается примерно три пробоины, и это не «десять пуль в одну дыру». При калибре 6,5 мм на 100 м диаметры пуль на кучной полке перекрываются, но еще можно пробовать их идентифицировать, на 200 м уже практически не перекрываются. Поэтому дистанции 200 м, а возможно даже и 100 м можно считать рабочими, по крайней мере для винтовок с невысокой кучностью, однако правильный рисунок пробоин и максимальная вероятность обнаружения кучной навески будет лучше на дистанции 300 метров. Современные средства наблюдения и визуализации позволяют реализовать тест и на дистанции до 500 метров.

Вернемся к классической дистанции 300 метров, чтобы определить практический диапазон ограничений по рабочим параметрам. Возьмем предельную нижнюю границу размера групп ES5 ≥ 0,1 MOA. Это тот самый добротный бенчрест – уровень, о котором говорил автор метода. Ему соответствует среднее квадратическое отклонение примерно Ϭmin = 0,035 MOA. Верхнюю границу диапазона определим как ES5 ≤ 0,5 MOA, или Ϭmin = 0,16 MOA, которая включает практически весь диапазон высокоточных спортивных винтовок. На дистанции 300 м линейный размер Ϭ6 соответствует 3,05 и 14 мм. Примем отношение n максимальной и минимальной навесок равным 3. На 300 м оставим расстояние между центрами точек попаданий крайних навесок 7 мм, которое в общем виде зависит от начальной скорости и БК пули, а также от атмосферных условий. Расстояние между центрами соседних с кучной навеской точек примем в диапазоне от 6 до 1 мм. Отношение n возьмем в диапазоне 2, 3 и 10. В таблицах ниже представлена вероятность выбора тройки 5–6–7 для линейной кучности на 300 метрах σ_6 = 3,05 и 14 мм. Основной шаг 7 мм, поэтому это k ≈ 0,44 и k = 2 соответственно. Первая таблица попадает в переходную зону, где работают и расстановка центров, и различие σ. Вторая — почти на правое плато, где расстановка центров уже не важна. Таблица 1: σmin = 3,05 мм. Сближение центров даёт большой выигрыш. При переходе от равномерного шага 7 мм к промежутку 1 мм для n =2 вероятность растёт в 4 раза (с 12,6 % до 50,9 %), для n = 3 в 3,3 раза (с 15,4 % до 51,4 %), для n = 10 в 1,9 раза (с 31,7 % до 58,7 %). Отдача от каждого миллиметра убывает. От 7 до 3 мм вероятность растёт примерно на 7 пунктов на миллиметр (при n = 2), от 3 до 1 мм — уже на 4–5. Первые доли миллиметра тоже работают: 6,8 мм дают +1,2 пункта при n = 2 и +1,1 при n = 10 n

и сближение частично заменяют друг друга. При равномерном шаге n решает многое: 12,6 % при n = 2 против 31,7 % при n = 10. При промежутке 1 мм разница сжимается до 8 пунктов (50,9 против 58,7 %).

Таблица 1. Вероятность выбора тройки 5–6–7, %, при σ min = 3,05 мм

Промежуток 5–6 и 6–7	n = 2		n = 3		n = 10	
	круговой	проекция	круговой	проекция	круговой	проекция
1 мм	50,9	52,5	51,4	48,1	58,7	46,3
2 мм	47,5	47,6	48,3	43,9	56,6	43,9
3 мм	41,5	39,9	43,0	37,0	53,1	39,7
4 мм	34,2	31,1	36,2	29,2	48,4	34,6
5 мм	26,4	22,7	28,8	21,6	43,0	29,0
6 мм	19,0	15,3	21,7	15,0	37,4	23,6
6,5 мм	15,7	12,2	18,4	12,2	34,5	21,1
6,8 мм	13,8	10,6	16,6	10,6	32,8	19,6
7 мм	12,6	9,6	15,4	9,7	31,7	18,7

Таблица 2. Вероятность выбора тройки 5–6–7, %, при σ min = 14 мм

Промежуток 5–6 и 6–7	n = 2		n = 3		n = 10	
	круговой	проекция	круговой	проекция	круговой	проекция
1 мм	20,3	16,9	26,7	20,8	50,0	36,2
3 мм	20,1	16,8	26,5	20,7	49,7	36,0
5 мм	19,6	16,3	25,8	20,1	49,1	35,3
6 мм	19,2	15,9	25,4	19,6	48,6	34,8
7 мм	18,7	15,4	24,8	19,0	48,1	34,2

Если центральная зона уже сближена, большое различие σ добавляет мало, и наоборот. Одна аномалия: при σ_6 = 3,05 мм и n = 2 проекция чуть выше кругового кластера при 1 мм (52,5 против 50,9 %) и совпадает при 2 мм. Это не ошибка. Когда центры 5, 6, 7 сближены почти вплотную, а разброс соседей лишь немного больше, поперечный разброс увеличивает диаметр центральной тройки сильнее, чем соседних. Точность: 1,5 млн реализаций на каждое значение, ±0,04 %. Проекция ведёт себя иначе, чем круговой кластер. При n = 2 она почти равна круговому кластеру на малых промежутках, а при 1 мм даже чуть выше (52,5 против 50,9 %); с ростом n отставание проекции растёт: 3–4 пункта при n = 2, до 7 при n = 3, 12–14 при n = 10; при малых промежутках проекция с ростом n даже падает: 52,5 → 48,1 → 46,3 % при 1 мм. Причина в механизме отбора минимума. Тройка соседних точек с большим σ может случайно сжаться и дать малый размах. На прямой для этого достаточно совпадения по одной координате, на плоскости нужно сжатие сразу по двум, что намного реже. Поэтому большой разброс соседей сильнее «ворует» выбор в проекции. Таблица 2: σmin = 14 мм. В этом случае расстановка центров почти не влияет. От 7 до 1 мм прирост всего 1,6–1,9 пункта при любом n. Разброс вдвое больше шага, и сдвиг центров на несколько миллиметров тонет в шуме. Строки таблицы различаются меньше, чем столбцы. Главный фактор повышения вероятности — n. При n = 10 (но это далекое от практики отношение)

центральная тройка выбирается почти в каждом втором случае: когда разброс велик, сильно различающиеся σ позволяют уверенно выделить самую «тихую» тройку. Значения уже близки к пределам при k → ∞; для n = 3 это 25,4 % (круговой) и 19,6 % (проекция). Проекция стабильно хуже, примерно в постоянной пропорции: около 0,83 от кругового кластера при n = 2, 0,77 при n = 3, 0,72 при n = 10. При большом разбросе поперечная координата даёт заметную часть информации о σ, и её потеря тем ощутимее, чем больше различаются σ. Сближение центров выгодно, пока σmin не больше примерно половины основного шага. При σmin порядка двух шагов и больше результат определяется только соотношением σ, и подбор расстановки теряет смысл. Погрешность метода Монте-Карло около ±0,04 %, так что все обсуждаемые различия значимы.

Заключение

Впервые проведен теоретический анализ лестничного теста Крейтона Одетта в диапазоне параметров $k=Б_6/h$, $n = Б_{max}/Б_{min}$ и $z = h_{max}/h_{min}$. Главный практический вывод: эффективность лестничного теста полностью зависит от того, сближаются ли в зоне кучной навески центры попаданий, или шаг между ними остается постоянным. Если исходить из того, что центры попаданий расположены на равном шаге друг от друга, то двухмерный кластер, и тем более его вертикальная проекция укажет на самую кучную навеску с низкой вероятностью. Для рассмотренного примера она составляет 19,44% при анализе двумерного кластера и только 13,08% при анализе вертикальных координат. Даже если считать успехом не точное попадание в лучшую навеску, а ошибку в один шаг, вероятность возрастает лишь до 54,4%. То есть, если центры попаданий не сближаются в области кучной навески, применение лестничного теста как способа выбора лучшей навески является в значительной степени неоправданным, потому что лестница без дополнительной проверки группами с высокой вероятностью укажет не на лучшую навеску, а на соседнюю или даже удалённую область. В этом случае стрелок фактически выбирает кластер, который определяется не соответствием его кучной навеске, а случайным разбросом пробоин. Красивое скопление на мишени может возникнуть случайно и не иметь отношения к истинной кучной навеске. Поэтому предположение о сближении центров в зоне кучной навески становится принципиальным для применения теста.

Если центры попаданий сближаются в области кучной навески, эффективность лестничного теста повышается, и практические закономерности подтверждаются теорией. Метод имеет практический смысл только при выполнении достаточно жёстких условий, которые многие его пользователи игнорируют. Во-первых, винтовка должна быть кучной. В терминах расчётов статьи это означает, что $Б_{min}$ кучной навески должна быть меньше примерно половины основного шага h между центрами попаданий удаленных навесок. Так при основном шаге 7 мм на 300 м метод становится заметно полезным при $Б_{min}$ около 3 мм, что соответствует очень высокой кучности бенчрест-уровня. При $Б_{min}$ около 14 мм, то есть при кучности порядка 0,5 MOA по ES_5, сближение центров почти не влияет на результат и обеспечивает низкую вероятность успеха: случайный разброс пробоин слишком велик и скрывает полезную геометрию. Реальный диапазон кучности ES_5 = (0,1–0,3) MOA. Во-вторых, в зоне кучной навески должно быть реальное сближение центров попаданий. Если

шаг между всеми центрами равен 7 мм, то при σ_{min} = 3,05 мм и n = 3 вероятность правильного выбора центральной тройки составляет только 15,4%. При сближении центров до 5 мм она возрастает до 28,8%, до 4 мм — до 36,2%, до 3 мм — до 43,0%, а при сближении до 1–2 мм достигает примерно 48–51%. При этом вероятность того, что кластер укажет на самую кучную навеску или на две соседних как на самую кучную, достигает 80%. Поэтому метод можно считать рабочим только тогда, когда соседние центры в зоне кучной навески сближаются сильно — хотя бы до 3–4 мм при основном шаге 7 мм. Слабое сближение с 7 до 6 мм даёт лишь ограниченный выигрыш и не делает тест надёжным. В-третьих, важно соотношение кучности не настроенной и настроенной винтовки: $n = \sigma_{max} / \sigma_{min.}$ При реалистичных значениях n = 2–3 вероятность точного выбора лучшей навески остаётся умеренной даже при хорошем сближении центров. Значения n ≈ 10 дают заметно более высокую вероятность, но такой перепад кучности при настройке только по навеске следует считать редким и не закладывать его в обычную практику. Поэтому стрелок не должен рассчитывать, что лестничный тест уверенно сработает только потому, что одна из навесок «должна быть намного лучше остальных». Дистанция также не является самостоятельным решением проблемы. Если центры попаданий не сближаются, увеличение дистанции теоретически может даже снизить вероятность правильного выбора. Большая дистанция полезна только тогда, когда она позволяет лучше различить пробоины, при этом винтовка достаточно кучна, а центры попаданий значительно сближаются в зоне кучной навески. На практике 100 м могут быть пригодны для менее кучных винтовок, 200 м часто являются разумным компромиссом, 300 м соответствуют классической логике теста, а 500 м имеют смысл только при хорошей оптике, видеонаблюдении или электронной мишени.

Особенно осторожно нужно относиться к анализу только вертикальной координаты. Практически стрелки часто смотрят именно высоту пробоин, потому что, как они считают, горизонтальный разброс загрязняется боковым ветром и другими случайными факторами, а на самом деле может быть вызван обычным круговым разбросом. Расчёты показывают, что переход от двухмерного кластера к одной вертикальной координате сильно уменьшает вероятность правильного выбора, примерно на 30 %.

В методе ничего не говорится о выборе глубины посадки пули для теста, и из-за этого возникает его принципиальная неопределенность. Учитывая зависимость кучной навески от глубины посадки пули, а также сильную зависимость кучности от посадки, последовательные процедуры «сначала кучная навеска на произвольной посадке – потом поиск кучной посадки на этой навеске» приведут к необходимости вторичной корректировки навески после нахождения кучной посадки или даже к пропуску самой кучной посадки, и в итоге метод потеряет свое главное преимущество экономичности.

Таким образом, лестничный тест Крейтона Одетта следует понимать как быстрый и не очень надежный предварительный способ поиска области-кандидата, имеющий принципиальные ограничения в применении. Практически наиболее корректная роль лестничного теста — не выбрать «готовую лучшую навеску», а сузить широкий диапазон поиска. После этого найденная область обязательно должна проверяться обычными группами. Без такой проверки даже самый красивый кластер на мишени остаётся только гипотезой, а не доказательством найденной кучной навески.

В заключительной части предложим посмотреть на реальные мишени с лестничным тестом [1], найденные нами в открытых источниках. Глядя на эти мишени, мы лишь с большой долей неопределенности можем указать на кластер, который бы выбрали маркером самой кучной навески. Но главное в представленных в работе [1] мишенях то, что ни к одной из них не было приложено финального теста, который бы подтверждал, что кластер указал на самую кучную навеску или навески рядом с ней.

Работа выполнена совместно с д.т.н Богословским В.Н

Список литературы

1. Богословский В.Н., Кадомкин В.В., Жуков И.Г. Статистический анализ лестничного теста Крейтона Одетта [Электронный ресурс]. // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. – 2022. URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/14808 (дата обращения: 13.10.2026).
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] / C. Zant. // Precision Rifle Blog. – 2012. URL: https://precisionrifleblog.com/2012/07/13/creighton-audette-ladder-testing/ (дата обращения: 10.10.2026).
4. Constantine R. Incremental Load Development Method / R. Constantine [Электронный ресурс]. // Precision Shooting Annual. – 1997. URL: http://precisionrifleblog.com/wp-content/uploads/2012/07/incremental-load-development-method.pdf (дата обращения: 10.10.2026).
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: 10.10.2026).
6. Moritz R. An Incremental Load Development Method [Электронный ресурс] / R. Moritz. // Black Powder Cartridge. URL: https://www.blackpowdercartridge.com/an-incremental-load-development-method (дата обращения: 10.10.2026).
7. Affleck D. ILDM Load Testing (aka “Ladder Test”) [Электронный ресурс] / D. Affleck. // Coyote Stuff. URL: https://coyotestuff.com/articles/ildm-load-testing-aka-ladder-test/ (дата обращения: 10.10.2026).
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: 10.10.2026).
9. Newberry D. Dan Newberry’s OCW Load Development System [Электронный ресурс] / D. Newberry. // BangSteel Long Range Shooting School. URL: https://bangsteel.com/ocw-reloading (дата обращения: 13.10.2026).
10. Litz B. Modern Advancements in Long Range Shooting. Vol. III. Cedar Springs, MI: Applied Ballistics, LLC, 2022. Chapter 6: Ladder Testing for Powder Charge. Available at: /2022/08/14/sneak-peek-of-bryan-litzs-new-book-volume-iii-of-modern-advancements-in-long-range-shooting/ [Электронный ресурс]. URL: https://precisionrifleblog.com (дата обращения: 13.10.2026).

11. Gordon’s Reloading Tool (GRT): программное обеспечение для расчёта внутренней баллистики патрона [Электронный ресурс]. – [Б. г.]. URL: https://grtools.de/doku.php?id=grtools%3Aen%3Adoku%3Ainstall (дата обращения: 13.10.2026).
12. 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., Kadomkin V.V., Zhukov I.G. Statistical Analysis of Creighton Audette’s Ladder Test // Universum: Technical Sciences: Electronic Scientific Journal. – 2026. – No. 12 (105) [Электронный ресурс]. – URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/14808.
2. Zhukov I.G. The Perfect Shot Is Simple!. 416 P. – Moscow: Knig.com Publishing House, 2023.
3. Zant C. Creighton Audette’s Ladder Test. Precision Rifle Blog, 2012, July 13. Available at: [Электронный ресурс]. – URL: https://precisionrifleblog.com/2012/07/13/creighton-audette-ladder-testing/ (accessed: 10.10.2026).
4. Constantine R. Incremental Load Development Method. Precision Shooting Annual. Bayfield, CO, Precision Shooting, Inc., 1997, P. 19. Available at: [Электронный ресурс]. – URL: http://precisionrifleblog.com/wp-content/uploads/2012/07/incremental-load-development-method.pdf (accessed: 10.10.2026).
5. Brief Overview of Creighton Audette’s 20 Round String Load Development Method. Precision Shooting Reloading Guide, 1998. Available at: [Электронный ресурс]. – URL: http://precisionrifleblog.com/wp-content/uploads/2012/07/excerpt-on-creighton-audettes-20-round-string-load-development.pdf (accessed: 10.10.2026).
6. Moritz R. An Incremental Load Development Method. Black Powder Cartridge. No date. Available at: [Электронный ресурс]. – URL: https://www.blackpowdercartridge.com/an-incremental-load-development-method (accessed: 10.10.2026).
7. Affleck D. ILDM Load Testing, also known as “Ladder Test”. Coyote Stuff. No date. Available at: [Электронный ресурс]. – URL: https://coyotestuff.com/articles/ildm-load-testing-aka-ladder-test/ (accessed: 10.10.2026).
8. The ladder test for rifle load development. Sporting Shooter, 2009, October 1. Available at: [Электронный ресурс]. – URL: https://sportingshooter.com.au/hunting-skills/the-ladder-test-for-rifle-load-development/ (accessed: 10.10.2026).
9. Newberry D. Dan Newberry’s OCW Load Development System. BangSteel Long Range Shooting School. No date. Available at: [Электронный ресурс]. – URL: https://bangsteel.com/ocw-reloading (accessed: 13.10.2026).
10. Litz B. Modern Advancements in Long Range Shooting. Vol. III. Cedar Springs, MI, Applied Ballistics, LLC, 2022. Chapter 6: Ladder Testing for Powder Charge. Available at: [Электронный ресурс]. – URL: https://precisionrifleblog.com/2022/08/14/sneak-peek-of-bryan-litzs-new-book-volume-iii-of-modern-advancements-in-long-range-shooting/ (accessed: 13.10.2026).

11. Gordon’s Reloading Tool (GRT): internal-ballistics software for cartridge load calculation. No date. Available at: [Электронный ресурс]. – URL: https://grtools.de/doku.php?id=grtools%3Aen%3Adoku%3Ainstall (accessed: 13.10.2026).
12. 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.

ЭКОЛОГИЯ И БЕЗОПАСНОСТЬ

ЭКОЛОГИЯ И ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Статья поступила в редакцию: 27.09.2026
Статья принята к публикации: 14.10.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 614.841.2

DOI: 10.32743/UniTech.2026.151.10.23565

Исследование эффективности современных технологий тушения лесных пожаров и совершенствование способов их применения

Литяга Артём Валерьевич
д.ф.т.н. (PhD), доц., доц.
кафедры Центра повышения квалификации сотрудников Министерства занятости и сокращения бедности
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Юлдашев Жавлонбек Раджапович
ст. преп
Академии Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Узбекистан
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: tyoma8812@mail.ru

Research on the effectiveness of modern forest fire suppression technologies and the Improvement of their application methods

Lityaga Artyom Valeryevich
PhD, Associate Professor
Department of the Center for Professional Development of Personnel
Ministry of Employment and Poverty Reduction
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Yuldashev Zhavlonbek Radzhapovich
senior Lecturer
Academy of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Uzbekistan
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Библиографическое описание: Литяга А.В., Юлдашев Ж.Р. Исследование эффективности современных технологий тушения лесных пожаров и совершенствование способов их применения // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23565

Аннотация

Целью настоящего исследования является оценка эффективности современных организационно-технических и тактических технологий тушения лесных пожаров, а также разработка научно обоснованных подходов к совершенствованию способов их применения в условиях горно-лесной местности. В качестве объекта исследования рассмотрены горно-лесные территории на примере Бостанлыкского лесного хозяйства, характеризующиеся сложным рельефом, изменчивыми метеорологическими условиями, неоднородностью растительного покрова и ограниченными возможностями подъезда пожарно-спасательной техники. При оценке условий возникновения и распространения пожара учитывались угол уклона местности, скорость и направление ветра, температура воздуха, относительная влажность, плотность растительного покрова, количество сухой горючей биомассы, удаленность водоисточников и автомобильных дорог, интенсивность антропогенной нагрузки, а также возможности безопасной эвакуации.

Для комплексной оценки пожарной обстановки предложено использование интегрального показателя риска, формируемого на основе совокупности природных, метеорологических, инфраструктурных и тактических факторов. В рамках исследования применены методы балльной оценки, нормирования отдельных параметров, геоинформационного анализа и зонирования территории по уровням пожарной опасности. В зависимости от совокупного значения показателей территория подразделяется на зеленую, желтую и красную зоны, для каждой из которых устанавливаются соответствующие способы мониторинга, размещения сил и средств, организации эвакуации и ведения пожаротушения.

Установлено, что применение комплексного риск-ориентированного подхода позволяет учитывать не только вероятность интенсивного распространения лесного пожара, но и фактическую доступность очага для пожарно-спасательных подразделений, наличие водоисточников, возможность использования беспилотных летательных аппаратов, авиационной техники и безопасных рубежей локализации пожара. Предлагаемый подход может быть использован при разработке цифровых карт пожарной опасности, предварительном размещении сил и средств, выборе рациональной тактики тушения и повышении безопасности личного состава при ликвидации лесных пожаров в горной местности.

Abstract

The aim of this study is to evaluate the effectiveness of modern organizational, technical, and tactical technologies used for forest fire suppression and to develop scientifically based approaches for improving their application in mountainous forest areas. Mountain forest territories, with the Bostanlyk forestry area considered as a case study, were examined as environments characterized by complex terrain, variable meteorological conditions, heterogeneous vegetation cover, and limited accessibility for fire and rescue vehicles. The assessment of forest fire occurrence and spread took into account terrain slope, wind speed and direction, air temperature, relative humidity, vegetation density, the amount of dry combustible biomass, distance to water sources and roads, anthropogenic activity, and evacuation conditions.

An integrated risk indicator based on a combination of natural, meteorological, infrastructural, and tactical factors is proposed for the comprehensive assessment of fire conditions. The study applies scoring, normalization of individual parameters, geographic information analysis, and territorial zoning according to fire risk levels. Depending on the cumulative value of the indicators, the territory is classified into green, yellow, and red zones, for which appropriate monitoring procedures, deployment of forces and equipment, evacuation measures, and firefighting tactics are determined.

Ключевые слова: лесной пожар, тушение лесных пожаров, горно-лесная местность, пожарная опасность, риск-индикатор, скорость ветра, уклон местности, горючие материалы, GIS, беспилотный летательный аппарат, пожарно-спасательные подразделения, зонирование территории.

Keywords: forest fire, forest firefighting, mountainous forest area, fire hazard, risk indicator, wind speed, terrain slope, combustible materials, GIS, unmanned aerial vehicle, fire and rescue units, territorial zoning.

Введение

Лесные экосистемы играют важную роль в регулировании климата, сохранении водных ресурсов, защите почв от эрозии и поддержании биологического разнообразия. По данным Глобальной оценки лесных ресурсов ФАО, площадь лесов мира составляет около 4,06 млрд га, однако ежегодное воздействие природных и антропогенных факторов продолжает создавать угрозу их устойчивости [3, с. 6–7]. Одним из наиболее опасных факторов являются лесные пожары, способные за короткое время охватывать значительные площади, нарушать функционирование экосистем и создавать угрозу населению и объектам инфраструктуры.

Тушение пожаров в горно-лесной местности осложняется пересеченным рельефом, ограниченной транспортной доступностью, быстрым изменением направления ветра, дефицитом водоисточников и трудностями эвакуации [3, с. 9–12]. В таких условиях скорость и направление распространения зоны горения определяются не одним параметром, а сочетанием свойств горючего материала, метеорологической обстановки и уклона местности. В классической модели Ротермела ветер, уклон и характеристики топлива рассматриваются как ключевые параметры прогнозирования распространения природного пожара [11, с. 6, 21–24, 35–39]. Развитие этой методологии представлено в системе стандартных моделей горючих материалов Скотта и Бургана [12, с. 1–6].

Традиционная организация пожаротушения преимущественно основывается на оценке фактической обстановки после обнаружения пожара и прибытия подразделений. Для горно-лесных территорий этого недостаточно: наиболее опасные участки, возможные пути распространения огня, подъездные дороги, водоисточники и маршруты эвакуации целесообразно определять заблаговременно [3, с. 12–22]. Международные рекомендации по управлению природными пожарами также рассматривают оценку опасности, раннее предупреждение, предварительную подготовку, обнаружение, первоначальную атаку и мониторинг как элементы единой системы [9, с. 8–16].

Цель исследования - обосновать возможность совершенствования способов тушения лесных пожаров в горно-лесной местности на основе комплексной оценки индикаторов риска и дифференцированного выбора тактики. Для достижения цели решались задачи систематизации факторов риска, формирования расчетной модели, балльного зонирования территории, оценки характерных участков и разработки рекомендаций по выбору оперативно-тактических действий.

Научно-практическая значимость работы заключается в объединении многофакторной оценки, GIS-зонирования и тактического планирования. Предлагаемый подход не подменяет решение руководителя тушения пожара, а предоставляет ему сопоставимую количественную и пространственную информацию для заблаговременного распределения сил и средств.

Материалы и методы исследования

Объект исследования и исходные данные

Объектом исследования являлись организационно-тактические процессы тушения лесных пожаров в условиях горно-лесной местности. В качестве расчетного объекта рассматривалась территория Бостанлыкского лесного хозяйства с учетом особенностей рельефа, растительного покрова, метеорологических условий, транспортной доступности, расположения водоисточников и возможности проведения эвакуационных мероприятий.

Метеорологические параметры, включая температуру воздуха, относительную влажность, скорость и направление ветра, подлежат оценке на основе данных официальных метеорологических наблюдений Узгидромета за установленный период исследования с указанием используемых метеостанций и временного разрешения измерений. Геоинформационное зонирование территории осуществляется путем формирования тематических слоев рельефа, растительного покрова, дорожной сети, водоисточников и метеорологических факторов с последующим присвоением балльных оценок, пространственным совмещением слоев и классификацией участков по трем уровням пожарной опасности в соответствии с установленными критериями.

Формирование исходной информационной базы осуществлялось поэтапно. На первом этапе систематизировались данные о появлении и метеорологических факторах, характеристиках растительного покрова, наличии сухой горючей биомассы, транспортной доступности, расположении водоисточников и антропогенной атмосферы. На втором исходном этапе параметры приводили к переходному пути посредством качественной или количественной оценки в соответствии с установленными критериями. На третьем этапе каждому фактору присваивалось значение по трёхбалльной шкале: 1 балл — доказанная опасность, 2 балла — средняя опасность, 3 балла — высокая опасность.

Для анализа пространственных параметров, территориальную привязку, рассматривались как разработка тематических слоев геоинформационной системы. К таким слоям относятся рельеф и уклон территории, растительный покров, автомобильные дороги, водоисточники и зоны антропогенной нагрузки. После выставления балльных оценок производится их территориальное измерение, суммирование и классификация участков по уровням опасности. На заключительном этапе результирующая карта наносит объекты,

имеющие непосредственное значение для оперативного реагирования: возможности направления распространения пожара, пути подъезда, водоисточники, точки размещения сил и средств и пути эвакуации.

Обработка метеорологических и оперативных мероприятий проводилась с учётом их работы по ликвидации последствий и тушению лесного пожара. При этом показатели влажности воздуха и влажности горючего материала рассматриваются раздельно. Данное разграничение необходимо для исключения некорректной замены одного показателя другими при расчётах.

В представленной работе статистические данные о ранее зарегистрированных пожарах использовались для общих характеристик пожарной безопасности и предварительных эмпирических проверок предлагаемого уровня. Для полноценной статистической валидации необходимо создать единую базу данных, в которой для каждого пожара будут синхронизированы внешние, метеорологические, природные и оперативные параметры.

В качестве исходной информационной базы использованы материалы методических рекомендаций по оценке индикаторов риска при ликвидации чрезвычайных ситуаций, связанных с пожарами в горно-лесной местности [3, с. 10–22]. В соответствии с рассматриваемой методикой пожарная опасность определяется не одним параметром, а совокупным воздействием природных, метеорологических, антропогенных и оперативно-тактических факторов.

К основным оцениваемым параметрам отнесены температура воздуха, относительная влажность, скорость и направление ветра, угол уклона местности, плотность растительного покрова, количество сухой горючей биомассы, удаленность водоисточников и автомобильных дорог, интенсивность пребывания людей, сведения о ранее зарегистрированных пожарах, а также условия доступа пожарно-спасательных подразделений и проведения эвакуации [3, с. 14–17].

При разработке расчетной модели учитывалось, что поведение лесного пожара в значительной степени зависит от сочетания свойств горючего материала, ветровой нагрузки и рельефа. В классических моделях распространения природных пожаров влияние ветра и уклона также рассматривается в качестве принципиальных параметров прогнозирования скорости распространения кромки пожара [11, с. 21–34].

Математическая модель и критерии оценки

Для комплексной количественной оценки использовался интегральный индикатор риска:

$$X_i = w_1R + w_2S + w_3V + w_4Y + w_5M + w_6K + w_7E, \quad (1)$$

где X_i - общий индикатор риска; R - риск, обусловленный рельефом и уклоном; S - ветровая составляющая; V - опасность горючих материалов; Y - влияние экспозиции склона; M - метеорологическая составляющая; K - сложность доступа сил и средств; E - эвакуационный риск; $w_1 \ldots w_7$ - весовые коэффициенты соответствующих факторов [3, с. 14].

Следует разграничивать структурную интегральную модель и операционную десятифакторную систему. Формула (1) определяет факторы в укрупнённых факторах, отражающие основные группы рисков, тогда как таблица 1 стала для краткого описания балльной оценки наблюдаемых факторов. Поэтому показатель IΣ, рассчитанный для территориального зонирования, не является прямой подстановкой всех десятичных факторов в формуле (1), а представляет собой самостоятельный операционный показатель, основанный на трехбалльной системе.

Такое определение принято для обеспечения практической применимости методики: интегральная модель описывает характер взаимосвязей факторов, а десятифакторный показатель обеспечивает воспроизводящую классификацию территории по доступным исходным данным.

Для весовых коэффициентов выполняется условие:

$$\Sigma_{i=1}^{7} w_i = w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + w_5 + w_6 + w_7 = 1. \quad (2)$$

Формула (1) Расчет как структурная модель интегральной оценки, определяющая взаимосвязь внешних факторов риска. Для получения счетных результатов весовых коэффициентов на следующем этапе исследования предусматривается проведение экспертного ранжирования факторов с последующим нормированием оценок таким образом, чтобы выполнялось условие $\Sigma w_i = 1$. Далее следует выполнить указанную процедуру основного расчёта критерия зонирования показателей по независимой десятифакторной трехбалльной системе, приведенной в таблице 1.

Такое разделение позволяет не смешивать структурную интегральную модель с расчётной балльной системой. Полученные в результате экспертного ранжирования коэффициенты должны использоваться при построении количественной валидации моделей на массиве реальных пожаров.

Влияние рельефа определяется путем нормирования фактического угла уклона:

$$R = (\alpha / \alpha_{max}) \cdot 100, \quad (3)$$

где α - фактический угол уклона территории, град.; α_{max} - максимальное значение уклона, принятое для расчетной модели, град.

При α = 25° и α_{max} = 45°:

$$R = (25 / 45) \cdot 100 = 55{,}6\ \%. \quad (4)$$

Следовательно, при данных условиях относительное влияние рельефа составляет 55,6 % от принятого максимального расчетного значения.

Нормированное влияние скорости ветра определялось по формуле:

$$S = (U / U_{max}) \cdot 100, \quad (5)$$

где U - фактическая скорость ветра, м/с; U_{max} - значение скорости ветра, принятое в качестве предельного расчетного уровня. В методических материалах для данного показателя в качестве примера принято U_{max} = 15 м/с [3, с. 15–16].

Показатель пожарной опасности, связанный с влажностью горючих материалов, определялся следующим образом:

$$N = 100 - W, \quad (6)$$

где N - индикатор опасности по влажности; W - влажность горючего материала, % [3, с. 17]. Чем меньше значение W, тем выше величина N, что отражает повышение готовности сухой растительной массы к воспламенению и развитию горения.

Для оценки совокупного метеорологического воздействия использовалась зависимость:

$$M = [T + (100 - H) + P] / 3, \quad (7)$$

где T - оценочный показатель температуры; H - относительная влажность воздуха, %; P - показатель дефицита атмосферных осадков [3, с. 17].

Показатель доступности очага пожара для пожарно-спасательной техники определялся по расстоянию до автомобильной дороги:

$$K = (L / L_{max}) \cdot 100, \quad (8)$$

где L - расстояние от подъездного пути до очага пожара; L_{max} - максимальное расчетное расстояние.

С учетом сложности рельефа данный показатель корректируется:

$$K_t = K \cdot k_r, \quad (9)$$

где k_r - коэффициент условий доступа: 1,0 - дорога имеется, движение возможно; 1,2 - подъездные пути имеются частично; 1,5 - дорога отсутствует, территория горная.

Например, при удалении очага от дороги на 4 км и принятом максимальном расстоянии 10 км:

$$K = (4 / 10) \cdot 100 = 40. \quad (10)$$

Если при этом дорога отсутствует и участок относится к труднодоступной горной местности:

$$K_t = 40 \cdot 1{,}5 = 60. \quad (11)$$

Таким образом, учет рельефа повышает расчетную сложность доступа с 40 до 60 условных единиц.

Эвакуационная составляющая определялась зависимостью:

$$E = (A + B + C) / 3, \quad (12)$$

где A - показатель присутствия людей; B - ограниченность или протяженность эвакуационного пути; C - недостаточность безопасных мест сбора [3, с. 16].

Риск, связанный с растительным горючим материалом, рассчитывался по формуле:

$$V = (D + Q + Z) / 3, \quad (13)$$

где D - плотность растительного покрова; Q - количество сухой горючей биомассы; Z - степень горючести растительных материалов. Каждый показатель может оцениваться по шкале от 0 до 100 баллов [3, с. 16–17].

Таблица 1. Критерии балльной оценки пожарной опасности горно-лесной территории

№	Оцениваемый фактор	Низкая опасность - 1 балл	Средняя опасность - 2 балла	Высокая опасность - 3 балла
1	Температура воздуха	до 20 °C	21–30 °C	31 °C и выше
2	Относительная влажность	более 60 %	40–60 %	менее 40 %
3	Скорость ветра	0–3 м/с	4–7 м/с	8 м/с и выше
4	Угол уклона	0–10°	11–25°	26° и выше
5	Плотность растительности	низкая	средняя	высокая
6	Количество сухой биомассы	малое	среднее	большое
7	Расстояние до водоисточника	до 500 м	500–1500 м	более 1500 м
8	Расстояние до дороги	до 300 м	300–1000 м	более 1000 м
9	Антропогенная активность	низкая	средняя	высокая
10	Предыдущие пожары	не зарегистрированы	зарегистрированы редко	регистрируются часто

Примечание - составлено по [3, с. 20].

Общий балльный показатель определяется суммированием частных оценок:

$$I\Sigma = \Sigma_{i=1}^{10} b_i, \quad (14)$$

где b_i - балльная оценка отдельного фактора; диапазон возможных значений составляет:

$$10 \le I\Sigma \le 30. \quad (15)$$

Для дополнительного сопоставления различных участков значение может быть нормировано по шкале 0–100 %:

$$I_n = [(I\Sigma - 10) / (30 - 10)] \cdot 100 = [(I\Sigma - 10) / 20] \cdot 100. \quad (16)$$

Таблица 2. Классификация территории по величине общего индикатора риска

Общий балл	Уровень опасности	Зона	Основная характеристика
10–16	низкий	зеленая	профилактический контроль является основным режимом
17–23	средний	желтая	требуется усиление наблюдения и оперативной готовности
24–30	высокий	красная	высока вероятность возникновения и интенсивного развития пожара; необходимы заблаговременные оперативные мероприятия

Примечание - классификация принята по [3, с. 20].

Результаты и обсуждение

Расчетная оценка показывает, что одним из факторов, способных наиболее быстро изменить тактическую обстановку, является скорость ветра. Согласно исходным материалам, в жаркий период на рассматриваемой территории скорость ветра может составлять 10–15 м/с, а относительная влажность воздуха - 50–70 % [3, с. 10].

При U_{max} = 15 м/с по формуле (5) получаем:

$$S_{10} = (10 / 15) \cdot 100 = 66{,}7\ \%; \quad (17)$$

$$S_{12} = (12 / 15) \cdot 100 = 80{,}0\ \%; \quad (18)$$

$$S_{15} = (15 / 15) \cdot 100 = 100\ \%. \quad (19)$$

Таблица 3. Расчетное изменение ветрового индикатора

Скорость ветра, м/с	Расчетный показатель S, %	Балльная оценка по табл. 1	Уровень по фактору ветра
3	20,0	1	низкий
5	33,3	2	средний
7	46,7	2	средний
10	66,7	3	высокий
12	80,0	3	высокий
15	100,0	3	высокий

Полученные расчетные значения свидетельствуют, что при характерной для жаркого периода скорости ветра 10–15 м/с ветровой фактор находится в диапазоне 66,7–100 % от принятого максимального значения. При этом, согласно балльной системе, все значения скорости ветра выше 8 м/с относятся к категории высокой опасности [3, с. 20].

Следовательно, даже при относительно благоприятных значениях отдельных метеорологических параметров высокая скорость ветра способна существенно осложнять ведение пожаротушения. Влияние ветра и уклона на скорость распространения зоны природного пожара соответствует базовым положениям математических моделей поведения лесного огня [11, с. 21–34].

При этом относительную влажность воздуха и влажность непосредственно горючего растительного материала необходимо методически разграничивать. Показатель H в формуле (7) характеризует влажность воздуха, тогда как W в формуле (6) относится к влажности горючего материала. Поэтому значение относительной влажности воздуха 50–70 %, приведенное в исходном материале, не должно автоматически подставляться вместо W без проведения соответствующих измерений.

Для оценки пространственной неоднородности территории дополнительно выполнена расчетная обработка представленного в исходном материале разделения участков по четырем непосредственно сопоставимым параметрам: уклон, плотность растительности, удаленность водоисточника и удаленность дороги [3, с. 18].

Введем частный тактический индекс:

$$I_4 = (b_r + b_v + b_x + b_h) / 4, \quad (20)$$

где b_r - балл уклона; b_v - балл плотности растительности; b_x - балл удаленности водоисточника; b_h - балл удаленности автомобильной дороги.

Сначала определяют исходный средний индекс как I_4,ср = ($b_r + b_v + b_x + b_h$) / 4. Затем его нормированное значение обозначаетть I_4,н:

$$I_4,н = [(I_4,ср - 1) / (3 - 1)] \cdot 100, \quad (21)$$

Такое обозначение ограничения на использование одного и того же символа для исходного среднего значения и его нормированной формы.

Таблица 4. Расчетный частный индекс для характерных участков территории

Участок территории	Уклон	Раститель-ность	Водоис-точник	Дорога	I_4	I_4н, %
Предгорные участки	1	2	1	1	1,25	12,5
Участки интенсивного туристического посещения	2	2	2	1	1,75	37,5
Густые арчовые насаждения	3	3	3	3	3,00	100,0
Сухие травяно-кустарниковые участки	2	2	3	2	2,25	62,5
Леса на крутых склонах	3	3	3	3	3,00	100,0
Низкие участки вблизи водоисточников	1	1	1	1	1,00	0

Примечание - расчет выполнен авторами на основе качественной классификации участков, приведенной в [3, с. 18]. Значение I_4 является частным расчетным индексом и не заменяет полный десятифакторный показатель IΣ.

Расчеты показывают существенное различие потенциальной сложности пожаротушения между отдельными типами территории. Для предгорных участков расчетный частный индекс составляет 12,5 %, тогда как для густых арчовых насаждений и лесов на крутых склонах достигает 100 %. Сухие травяно-кустарниковые участки занимают промежуточное положение - 62,5 %.

Это объясняется тем, что в густых насаждениях на крутом склоне одновременно сочетаются несколько неблагоприятных факторов: высокая плотность горючей растительности, удаленность водоисточника, ограниченная транспортная доступность и влияние уклона на распространение огня. В таких условиях применение исключительно прямой атаки на зону пожара может быть ограничено требованиями безопасности личного состава.

Для практического выбора тактики результаты оценки целесообразно связывать с установленным уровнем риска. Формализованное правило выбора базового варианта действий может быть представлено следующим образом:

$$T(IΣ) = T_1 \text{ при } 10–16;\ T_2 \text{ при } 17–23;\ T_3 \text{ при } 24–30, \quad (22)$$

где T_1 - тактика для зеленой зоны; T_2 - тактика для желтой зоны; T_3 - тактика для красной зоны.

Таблица 5. Рекомендуемые способы действий в зависимости от расчетной зоны. Примечание - систематизировано на основе [3, с. 13, 18–22]

Показатель	Зеленая зона	Желтая зона	Красная зона
Режим наблюдения	плановый мониторинг	усиленный мониторинг	постоянный оперативный контроль
Размещение сил	штатное	резервные силы вблизи опасного участка	предварительное сосредоточение сил и средств
Основная тактика	непосредственное воздействие на очаг, локализация малых участков	ограничение фронта и флангов, устройство защитных полос	комбинированная и дистанционная тактика с безопасных рубежей
Водообеспечение	штатные источники	предварительная проверка и подготовка источников	создание резервов и организация подвоза воды
Минерализованные полосы	профилактически	создаются на угрожаемых направлениях	формируются заблаговременно на расчетных рубежах
БПЛА/GIS	периодический мониторинг	регулярная разведка обстановки	постоянная разведка и уточнение направления распространения
Авиация	как правило, не требуется	по обстановке	целесообразна при труднодоступности наземных сил
Эвакуация	маршруты определены	готовность к выводу людей	реализация заранее подготовленного плана эвакуации

Исходная методика предусматривает последовательный переход от сбора исходной информации к ее геоинформационной обработке. Сначала формируются данные о температуре, ветре, влажности, уклоне, растительности, дорогах и водоисточниках; затем каждый параметр вводится в GIS как отдельный тематический слой; факторы оцениваются по балльной шкале; значения объединяются в общий показатель; территория разделяется на зеленую, желтую и красную зоны; после чего на карту наносятся точки пожаротушения, водоисточники и эвакуационные маршруты [3, с. 17].

Таблица 6. Алгоритм формирования карты оперативного пожарного риска

Этап	Выполняемая операция	Практический результат
1	Сбор природных, метеорологических и антропогенных данных	формирование исходной информационной базы
2	Внесение факторов в GIS	создание тематических информационных слоев
3	Балльная оценка факторов	получение сопоставимых значений риска
4	Суммирование оценок	определение IΣ
5	Зонирование	выделение зеленой, желтой и красной зон
6	Нанесение сил, дорог, водоисточников и путей эвакуации	получение оперативной карты для принятия решений

Применение GIS в данном случае имеет принципиальное значение, поскольку пространственное положение опасного участка определяет не только вероятность распространения огня, но и фактическую возможность ввода пожарно-спасательных подразделений. В международных подходах к управлению природными пожарами также

выделяются оценка пожарной опасности, раннее предупреждение, предварительная подготовка, обнаружение, диспетчеризация, первоначальная атака, управление крупным пожаром и мониторинг как взаимосвязанные элементы единой системы управления [1].

Особое значение это имеет для участков, куда невозможно обеспечить безопасное приближение пожарных автомобилей. В исходных материалах для таких условий предусмотрено использование авиационных средств и беспилотного мониторинга [3, с. 13, 18–22]. В этом случае беспилотные летательные аппараты могут использоваться прежде всего для уточнения границ пожара, определения направления движения кромки пожара, выявления опасных участков и контроля ситуации без непосредственного нахождения разведывательной группы в зоне повышенного риска.

Сопоставление расчётного индикатора риска с фактическими данными о лесных пожарах

Для эмпирической проверки практической применимости предложенного дополнительно дополнительно проанализированы фактические данные о лесных пожарах, зарегистрированных на территории Республики Узбекистан. Согласно представленным статистическим материалам, за рассматриваемый период зарегистрированы случаи лесных пожаров и пожаров, повлекшие за собой значительные разрушения растительности на территориях. Анализ распределения пожаров по месяцам показывает выраженную сезонную интенсивность: наибольшее количество зарегистрированных случаев произошло в годовом периоде, причем наибольшее значение в представленной выборке отмечено в августе.

Отдельный интерес к проверкам, ориентированным на риск, проявляется в крупных пожарах, для ликвидации которых требовалось привлечение значительных сил и средств. Так, при крупном пожаре в Зоминском районе авиационной Джизакской области огнем было охвачено около 80 га сухой травянистой и древесной растительности, а к ликвидации пожара привлекались пожарно-спасательные подразделения, личный состав других ведомственных и служебных средств. В другом случае, произошедшем в 2023 году на территории службы лесоохотничьего хозяйства «Далварзин» Ташкентской области, произошел пожар площадью 455 га, из которых 150 га прибыли на лесные насаждения. Указанные особенности характеризуются сочетанием площади пожара, сложностью его местоположения и необходимостью включения дополнительных сил и средств.

Сопоставление приведённых реальных причин с предложенной системой показывает, что наиболее масштабные пожары соответствуют условиям, когда экономические факторы риска получают высокие балльные значения: отсюда следует, что площадь горючей растительности, удаленность от доступных способов подъезда, необходимость организации водоснабжения, сложность рельефа и потребность в применении дополнительных средств разведки и тушения. Таким образом, фактические данные подтверждают содержательную связь между экономическими сочетаниями факторов, независимой моделью и повышением сложности оперативного реагирования.

При этом прямое статистическое рассмотрение числа значений $I\Sigma$ с вероятностью возникновения пожара в данной работе не происходит, поскольку возникает статистический материал, не содержащий для каждого зарегистрированного пожара совокупных исходных результатов по всем десяти факторам моделей в единой временной и пространственной

привязке. Таким образом, завершенное рассмотрение результатов в качестве предварительной эмпирической апробации модели, подтверждающей ее практическую направленность, но не заменяющей полноценную статистическую валидацию.

Для составления количественной валидации модели создают единую основу фактических пожаров с указанием координаты, времени возникновения, метеорологических условий, характеристик горючей нагрузки, уклона территории, расстояния до дорог и водоисточников, антропогенной нагрузки и последствий тушения. На основании такой базы для каждого случая может быть рассчитан IΣ и проведена статистическая оценка связи между его значениями и фактическими последствиями пожара.

Сравнительная оценка результатов

Предлагаемый риск-ориентированный подход отличается от традиционного варианта организации действий тем, что пожарная обстановка оценивается не только после прибытия подразделений к месту происшествия, но и заблаговременно - на основе совокупности пространственных и метеорологических показателей.

Таблица 7. Сравнение традиционного и риск-ориентированного подходов к организации тушения лесных пожаров

Критерий	Традиционный подход	Предлагаемый риск-ориентированный подход
Основа решения	фактическая обстановка после обнаружения пожара	предварительная и текущая многофакторная оценка
Рельеф	учитывается непосредственно при ведении работ	оценивается заранее и включается в расчет
Ветер	учитывается по текущей обстановке	включается в количественный индикатор
Растительная горючая нагрузка	преимущественно визуальная оценка	отдельный расчетный фактор
Доступ техники	оценивается при следовании и разведке	включается в предварительную карту риска
Водоисточники	поиск по фактической необходимости	наносятся на GIS-карту заранее
Расстановка сил	после уточнения обстановки	может планироваться по зонам риска
БПЛА	дополнительное средство	элемент постоянной разведки наиболее опасных зон
Эвакуация	организуется по текущей угрозе	маршруты определяются на этапе планирования
Тактика	определяется руководителем тушения по обстановке	решение дополнительно поддерживается расчетным индексом

Преимущество предлагаемой модели заключается не в замене профессионального решения руководителя тушения пожара математическим расчетом, а в предоставлении ему дополнительной количественной и пространственной информации.

Наиболее выраженное значение такой подход имеет при сочетании нескольких неблагоприятных факторов. Например, участок с большим углом уклона, плотной сухой растительностью, ветром более 8 м/с, значительным удалением от дороги и водоисточника будет одновременно получать повышенные оценки по нескольким критериям. В результате переход такого участка в красную зону происходит не на основании субъективной оценки одного признака, а по совокупности показателей.

Одновременно необходимо учитывать ограничения разработанного подхода. Исходный материал содержит методику оценки и систему критериев, однако не содержит достаточной серии независимых натурных наблюдений, позволяющей статистически определить оптимальные значения весовых коэффициентов w_i, доверительные интервалы и прогностическую точность модели. Поэтому значения индикатора на данном этапе следует рассматривать прежде всего как инструмент оперативной классификации и поддержки принятия решений, а не как статистически верифицированную вероятность возникновения пожара.

Для дальнейшей валидации модели целесообразно сопоставлять рассчитанный уровень IΣ с фактическими данными о произошедших пожарах, площадью распространения огня, временем локализации, количеством привлекаемых сил и средств и продолжительностью ликвидации. При накоплении достаточной выборки значения весовых коэффициентов в формуле (1) могут уточняться статистическими методами.

Границы применимости и ограничения разработанного протокола

Разработанный подход предназначен для предварительной оценки уровня пожарной опасности и поддержки принятия оперативно-тактических решений в горно-лесных условиях. Основной областью его применения является зонирование территории преимущественного действия в целях восстановления природных, метеорологических, инфраструктурных и оперативно-тактических факторов.

Полученные значения IΣ не следует интерпретировать как статистическую угрозу возникновения лесного пожара. Индикатор характеризует относительный уровень уровня фактора, обеспечивающий влияющие на отношения и распространение пожара, а также на класс доступа пожарно-спасательных условий. Поэтому использование показателя должно осуществляться совместно с текущей оперативной информацией и теоретическим подходом к тушению пожара.

Применение модели требует регулярного обновления исходных данных, прежде всего, выявления метеорологической теории, состояния растительного покрова, доступности дорог и водоисточников, а также антропогенной атмосферы. При улучшении исходных условий результаты зонирования должны пересчитываться.

Ограничением настоящего исследования является отсутствие достаточного массива независимых наблюдений, анализа полного набора факторов для каждого зарегистрированного пожара. По этой причине на данной стадии модель используется как расчётно-аналитический инструмент предварительной классификации территории. Определение статистически обоснованных весовых коэффициентов, оценка прогностической точности и построение доверительных интервалов требуют расширения эмпирической базы и проведения отдельных этапов валидации.

Выводы

Проведено исследование возможности совершенствования способов тушения лесных пожаров на основе комплексной оценки природных, метеорологических, инфраструктурных и оперативно-тактических факторов. В качестве расчетной основы использована система

индикаторов пожарного риска горно-лесной территории, включающая рельеф, ветер, свойства растительного горючего материала, метеорологические условия, транспортную доступность и эвакуационную составляющую [3, с. 14–17].

Для практической оценки применена десятифакторная трехбалльная система. При суммарном результате 10–16 баллов территория относится к зеленой зоне, 17–23 балла - к желтой, 24–30 баллов - к красной зоне [3, с. 20]. Такое разделение позволяет непосредственно связать величину расчетного риска с режимом мониторинга, порядком размещения сил и средств и выбором тактического способа пожаротушения.

Расчет влияния ветра показал, что при характерной для жаркого периода скорости 10–15 м/с нормированный ветровой показатель составляет 66,7–100 % от принятого расчетного максимума. В соответствии с трехбалльной классификацией весь данный диапазон относится к высокому уровню опасности по фактору ветра.

На основе классификации отдельных территориальных участков рассчитан дополнительный частный индекс I_4. Для предгорных участков его нормированное значение составило 12,5 %, для участков интенсивного туристического посещения - 37,5 %, сухих травяно-кустарниковых территорий - 62,5 %, а для густых арчовых насаждений и лесов на крутых склонах - 100 %. Полученные значения демонстрируют существенное различие тактических условий пожаротушения в зависимости от сочетания рельефа, растительности, водообеспечения и транспортной доступности.

Предложенная система позволяет перейти от оценки отдельных факторов к комплексному выбору тактики. Для зеленой зоны основным является профилактический контроль и непосредственное тушение малых очагов; для желтой - усиленная разведка, ограничение распространения пожара и готовность резервных подразделений; для красной - предварительное сосредоточение сил, использование безопасных рубежей, GIS и беспилотных летательных аппаратов, подготовка эвакуационных мероприятий и, при необходимости, применение авиационных средств.

Таким образом, совершенствование технологий тушения лесных пожаров целесообразно осуществлять путем интеграции многофакторной оценки риска, GIS-зонирования, беспилотной разведки и дифференцированного выбора тактики тушения. Практическая реализация данного подхода создает условия для более обоснованного распределения сил и средств и повышения безопасности пожарно-спасательных подразделений.

Вместе с тем, проведенное исследование имеет методологические ограничения, связанные с отсутствием сложного массива результатов, представлен полный набор исходных параметров для каждого фактического пожара. Полученные результаты следует рассматривать как предварительную эмпирическую апробацию риск-ориентированной ситуации. Дальнейшие исследования должны быть направлены на сбор пространственных и временных оценок данных о лесных пожарах, проведение экспертной оценки весовых коэффициентов, количественной статистической валидации IΣ и оценки прогностической точности моделей. Это позволит повысить обоснованность дифференцированного выбора тактики тушения и увеличить область практического применения разработанного режима.

Список литературы

1. Закон Республики Узбекистан от 16 апреля 2018 г. № ЗРУ-475 «О внесении изменений и дополнений в Закон Республики Узбекистан „О лесе“».
2. Постановление Кабинета Министров Республики Узбекистан от 22 ноября 1999 г. № 506 «Об утверждении отдельных нормативных документов по охране лесов республики».
3. Постановление Кабинета Министров Республики Узбекистан от 19 июля 2017 г. № 530 «О мерах по дальнейшему совершенствованию системы управления лесным хозяйством».
4. Постановление Кабинета Министров Республики Узбекистан от 17 января 2020 г. № 31 «О мерах по совершенствованию ведения государственного учёта и мониторинга лесов».
5. Каландаров, М.М. Лесоводство: учебное пособие для профессиональных колледжей лесоводческого направления / М.М. Каландаров. С. 19–23, 128–134, 141–145. – Ташкент: Yangi nashr, 2008.
6. Литяга, А.В. Оценка индикатора риска при ликвидации чрезвычайных ситуаций, связанных с пожарами на территории горных лесов (на примере Бостанлыкского лесного хозяйства): методические рекомендации / А.В. Литяга, Ж.Р. Юлдашев. С. 4–5. – Ташкент: Академия Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Узбекистан, 2026.
7. Эртуғрул, М. Химические вещества, применяемые при тушении лесных пожаров / М. Эртуғрул // Журнал лесного факультета Бартына. – 2007. – Т. 9, № 12. – С. 11–19.
8. A. Kavgacı, M.A. Başaran. Kavgacı, A. Лесные пожары. – 2023. – 39 с.
9. A. Kavgacı, M.A. Başaran. Kavgacı, A. Лесные пожары // Издание Ассоциации лесоводов Турции. – 2023.
10. Методы борьбы с лесными пожарами: учебный материал в формате PDF / Караденизский технический университет. – Трабзон: [б. г.].
11. Rothermel, R.C. A Mathematical Model for Predicting Fire Spread in Wildland Fuels / R.C. Rothermel; USDA Forest Service Research Paper INT-115. – Ogden, Utah: Intermountain Forest and Range Experiment Station. – 1972. – 40 P.
12. Scott, J.H. Standard Fire Behavior Fuel Models: A Comprehensive Set for Use with Rothermel’s Surface Fire Spread Model / J.H. Scott, R.E. Burgan; General Technical Report RMRS-GTR-153. – Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. – 2005. – 72 P.

References

1. Law of the Republic of Uzbekistan No. ZRU-475 of April 16, 2018, “On Amendments and Additions to the Law of the Republic of Uzbekistan ‘On Forests’.” – 19 P.
2. Qalandarov M.M. Forestry: A Textbook for Vocational Colleges Specializing in Forestry. P. 19–23, 128–134, 141–145. – Tashkent: Yangi Nashr, 2008.

3. Lityaga A.V., Yuldashev J.R. Assessment of the Risk Indicator in Responding to Emergencies Caused by Fires in Mountain Forest Areas (A Case Study of the Bostanlyk Forestry Enterprise): Methodological Recommendations. 4. – Tashkent: Academy of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Uzbekistan, 2026. – 5 P.
4. Forest Fire Suppression Methods: Educational Material in PDF Format. – Trabzon: Karadeniz Technical University, [n.d.].
5. Resolution of the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan No. 530 of July 19, 2017, “On Measures for the Further Improvement of the Forest Management System”. – 20–22 P.
6. Resolution of the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan No. 31 of January 17, 2020, “On Measures to Improve the Maintenance of the State Forest Inventory and Forest Monitoring”. – 37–39 P.
7. Resolution of the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan No. 506 of November 22, 1999, “On the Approval of Certain Regulatory Documents Concerning the Protection of the Republic’s Forests”. – 13–14 P.
8. Ertuğrul M. Chemicals Used in Forest Fire Suppression // Bartın Faculty of Forestry Journal. – 2007. – Vol. 9, No. 12. – P. 11–19.
9. Kavgacı A., Başaran M.A. Forest Fires // Publication of the Foresters’ Association of Türkiye. – 2023.
10. Kavgacı A., Başaran M.A. Forest Fires. – Ankara. – 2023. – 39 P.
11. Rothermel R.C. A Mathematical Model for Predicting Fire Spread in Wildland Fuels. – USDA Forest Service Research Paper INT-115. – Ogden, Utah: Intermountain Forest and Range Experiment Station. – 1972. – 40 P.
12. Scott J.H., Burgan R.E. Standard Fire Behavior Fuel Models: A Comprehensive Set for Use with Rothermel’s Surface Fire Spread Model. – General Technical Report RMRS-GTR-153. – Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. – 2005. – 72 P.

Статья поступила в редакцию: 04.10.2026
Статья принята к публикации: 17.10.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 614.895

DOI: 10.32743/UniTech.2026.151.10.23580

Охрана труда работников в цехах деревообрабатывающих предприятий

Мамаджанов Зокиржон Нематжанович
доц.
Наманганский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Наманган
E-mail: zokirjon.mamadjanov.79@gmail.com

Мамадалиев Адхамжон Тухтамирзаевич
доц.
Наманганский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Наманган

Occupational safety of workers in woodworking enterprise shops

Mamadzhanov Zokirjon Nematjanovich
Associate Professor
Namangan State Technical University
Republic of Uzbekistan, Namangan

Mamadaliev Adkhamjon Tukhtamirzaevich
Associate Professor
Namangan State Technical University
Republic of Uzbekistan, Namangan

Аннотация

В статье рассматриваются опасные и вредные производственные факторы, характерные для основных цехов деревообрабатывающих предприятий, и обосновываются направления совершенствования системы охраны труда на основе оценки профессиональных рисков. Систематизированы механические, физические, аэродисперсные, химические, электрические и пожаро-взрывоопасные факторы, возникающие при распиловке, строгании, фрезеровании, сушке древесины, антисептической обработке и нанесении лакокрасочных покрытий. Раскрыты критерии предварительной оценки рисков с использованием матрицы вероятности возникновения опасного события и тяжести его последствий. Предложены показатели для количественного сопоставления условий труда до и после внедрения инженерных средств защиты. На основе современных научных публикаций рассмотрены результаты исследований воздействия древесной пыли и эффективности технических средств её удаления. Уточнены

Библиографическое описание: Мамаджанов З.Н., Мамадалиев А.Т. Охрана труда работников в цехах деревообрабатывающих предприятий // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23580

критерии отбора источников, порядок сравнительного анализа и принципы формирования классификации опасностей. Предложена поэтапная модель управления охраной труда, предусматривающая выявление опасностей, оценку рисков, применение инженерных и организационных мер, использование средств индивидуальной защиты и последующий мониторинг. Практическая значимость исследования заключается в возможности применения предложенной методики при предварительной оценке профессиональных рисков и разработке профилактических мероприятий в деревообрабатывающих цехах.

Abstract

The article examines hazardous and harmful occupational factors in woodworking shops and proposes an approach to improving occupational safety through risk assessment. Mechanical, physical, airborne, chemical, electrical, and fire and explosion hazards associated with sawing, planing, milling, wood drying, antiseptic treatment, and coating operations are classified. A preliminary risk assessment method based on the likelihood of hazardous events and the severity of their consequences is presented. Quantitative indicators for comparing workplace conditions before and after the implementation of engineering controls are proposed. Recent scientific studies on wood dust exposure and dust extraction effectiveness are reviewed. The criteria for selecting scientific and regulatory sources, the comparative analysis procedure, and the principles used to classify hazards are specified. A staged occupational safety management model is proposed, covering hazard identification, risk assessment, engineering and organizational controls, personal protective equipment, and subsequent monitoring. The proposed approach may be used for preliminary occupational risk assessment and the development of preventive measures in woodworking facilities.

Ключевые слова: охрана труда, деревообработка, профессиональный риск, древесная пыль, аспирация, вентиляция, оценка опасностей, средства индивидуальной защиты.

Keywords: occupational safety, woodworking, occupational risk, wood dust, dust extraction, ventilation, hazard assessment, personal protective equipment.

Введение

Деревообрабатывающая промышленность производит строительные материалы, мебель, паркет, древесные плиты, фанеру и другие изделия. Технологические процессы включают распиловку, окорку, строгание, фрезерование, сушку, склеивание, антисептическую обработку и нанесение лакокрасочных покрытий. Каждый из этих процессов характеризуется специфическими источниками опасности, которые могут воздействовать на работников одновременно. К основным производственным опасностям относятся движущиеся механизмы и режущие инструменты, выбросы заготовок, древесная пыль, шум, вибрация, химические вещества, электрические опасности и возможность возникновения пожара или взрыва. Особого внимания требует древесная пыль, поскольку она способна вызывать неблагоприятные последствия для здоровья и при определённых условиях создавать пожарную и взрывную опасность [5–7, 10, 13].

Исследование, опубликованное в 2024 году в журнале *Annals of Work Exposures and Health*, охватывало 22 предприятия и 252 измерения воздействия древесной пыли. В 15 измерениях, или 6 % общей выборки, концентрация превышала 5 мг/м³. Авторы также отметили необходимость совершенствования местной вытяжной вентиляции при шлифовании и использовании ручных инструментов [13]. Эти данные характеризуют обследованные британские предприятия и не должны автоматически переноситься на условия производства в Республике Узбекистан. Современный подход к охране труда предполагает переход от устранения последствий происшествий к систематическому выявлению опасностей, оценке рисков и применению профилактических мер. При этом приоритет должен отдаваться устранению опасности или снижению её воздействия инженерными средствами, а не только обеспечению работников средствами индивидуальной защиты [1, 12].

Цель исследования – систематизировать опасные и вредные производственные факторы деревообрабатывающих предприятий и разработать методический подход к их предварительной количественной оценке и выбору профилактических мероприятий.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

- классифицировать опасности по основным цехам и технологическим операциям;
- определить критерии предварительной оценки профессиональных рисков;
- обосновать показатели эффективности инженерных средств защиты;
- уточнить принципы отбора и сравнительного анализа научных и нормативных источников;
- предложить последовательность организации профилактических мероприятий.

Материалы и методы

Исследование основано на анализе нормативных документов Республики Узбекистан, международных стандартов по управлению охраной труда, научных публикаций по оценке воздействия древесной пыли и технических материалов организаций, занимающихся вопросами производственной безопасности.

При отборе научных источников учитывались соответствие тематике исследования, наличие описания методов измерения или оценки профессиональных рисков, представление количественных результатов, доступность библиографических данных и возможность проверки публикации по DOI или официальной странице издателя. Особое внимание уделялось исследованиям 2022-2025 годов. Более ранние нормативные документы и стандарты сохранялись в тех случаях, когда они необходимы для раскрытия правовых и технических требований.

Сравнительный анализ проводился по четырём направлениям: характер опасности, метод её выявления, показатель оценки воздействия и рекомендуемая мера контроля. На этой основе сформирована классификация по принципу «технологический процесс – источник опасности – возможные последствия – показатель оценки – профилактические мероприятия».

Для предварительной оценки профессионального риска предлагается использовать матричный метод, основанный на двух параметрах: вероятности возникновения опасного события и тяжести возможных последствий.

Интегральный показатель риска определяется по формуле:

$$R = p \times s,$$

где R – балл риска; P – оценка вероятности опасного события по пятибалльной шкале; S — оценка тяжести последствий по пятибалльной шкале.

Вероятность оценивается от 1 до 5: от редкого события до события, которое ожидается часто. Тяжесть последствий оценивается от 1 до 5: от незначительного повреждения до смертельного или другого катастрофического исхода.

Предлагаемая шкала интерпретации риска:

- 1-4 балла – низкий риск;
- 5-9 баллов – умеренный риск;
- 10-16 баллов – высокий риск;
- 17-25 баллов – критический риск.

Указанные интервалы являются предлагаемой рабочей шкалой для предварительной оценки и должны быть утверждены организацией с учётом действующих нормативных требований, отраслевых условий и принятого порядка управления рисками. Балльная оценка не заменяет инструментальные измерения концентрации пыли, шума, химических веществ и других производственных факторов.

Результаты и обсуждение

Классификация опасностей в деревообрабатывающих цехах. Опасные и вредные производственные факторы классифицированы по характеру воздействия и особенностям технологического процесса.

Механические факторы связаны с движущимися частями оборудования, режущими инструментами, конвейерами и перемещением заготовок. Физические факторы включают шум, вибрацию, повышенную температуру и недостаточное освещение. Аэродисперсные факторы представлены древесной пылью и мелкими частицами материала. Химические факторы возникают при использовании антисептиков, клеев, растворителей и лакокрасочных материалов. Электрические опасности обусловлены неисправностью оборудования и нарушением требований электробезопасности. Пожаро-взрывоопасные факторы связаны с горючими материалами, древесной пылью и парами растворителей [1, 4, 7, 8].

Таблица 1. Опасности, последствия и меры контроля в основных цехах деревообрабатывающего предприятия

Цех или процесс	Основные опасности	Показатель оценки	Приоритетные меры защиты
Окорка древесины	Вращающиеся механизмы, конвейеры, шум	Частота опасных ситуаций, уровень шума	Ограждения, блокировки, шумоизоляция
Распиловка	Контакт с пилой, выброс заготовки, пыль	Частота инциден-тов, концентрация пыли	Защитные устройства, аспирация, толкатели
Строгание	Режущие ножи, шум, пыль	Частота опасных ситуаций, уровень шума и пыли	Ограждения, местная вытяжка

Цех или процесс	Основные опасности	Показатель оценки	Приоритетные меры защиты
Фрезерование	Высокоскоростной инструмент, выброс частиц	Частота инцидентов, концентрация пыли	Зажимные приспособления, блокировки, аспирация
Антисептическая обработка	Химические растворы и пары	Концентрация вещества, контакт с кожей	Герметизация, вентиляция, подходящие СИЗ
Производство паркета	Движущиеся платформы, защемление	Число опасных ситуаций, исправ-ность блокировок	Механические упоры, блокировка, механизация
Лакокрасочные работы	Пары растворителей, горючие вещества	Концентрация паров, состояние вентиляции	Местная вытяжка, безопасное хранение, контроль источников зажигания
Сушильная камера	Высокая температура, пожар	Температура, исправность автоматики	Контроль температуры, вентиляция, аварийное отключение
Склад	Падение грузов, защемление	Число опасных ситуаций, устойчивость штабелей	Механизация, ограничение нагрузки, безопасная схема складирования
Удаление отходов	Пыль, стружка, горючие отложения	Запылённость, частота накопления отходов	Аспирация, уборка промышленным пылесосом, контроль пожароопасности

Примечание: показатели в таблице обозначают параметры, которые следует измерять или регистрировать при обследовании конкретного предприятия. Они не являются результатами собственных инструментальных измерений авторов.

Таблица показывает, что одна и та же технологическая операция может создавать несколько взаимосвязанных опасностей. Например, при распиловке одновременно присутствуют риск механической травмы, образование пыли и шум. Поэтому оценка должна учитывать не только отдельные факторы, но и условия их совместного воздействия.

Методика количественной оценки профессиональных рисков. Для практического применения предложена матрица, позволяющая предварительно ранжировать опасности по степени риска.

Матрица оценки профессионального риска

Таблица 2. Примечание: S – тяжесть последствий; P – вероятность события. Интерпретация баллов приведена в разделе «Материалы и методы»

Вероятность P	S = 1	S = 2	S = 3	S = 4	S = 5
1 – редкая	1	2	3	4	5
2 – маловероятная	2	4	6	8	10
3 – возможная	3	6	9	12	15
4 – вероятная	4	8	12	16	20
5 – частая	5	10	15	20	25

Для иллюстрации применения методики рассмотрим условный пример оценки опасностей при распиловке древесины.

Пример 1. Для опасного контакта с режущим инструментом экспертная группа предварительно присвоила вероятность P = 3, а тяжесть последствий S = 5. Тогда: R = 3 × 5 = 15 баллов.

По предложенной шкале это высокий риск. Следовательно, необходимо проверить конструкцию защитного ограждения, исправность блокировок, наличие аварийного отключения и безопасную организацию подачи заготовок.

Пример 2. Для воздействия древесной пыли до установки дополнительных средств контроля условно приняты P = 4 и S = 3: R = 4 × 3 = 12 баллов.

После установки и проверки местной вытяжной системы вероятность воздействия может быть переоценена, однако её снижение нельзя считать доказанным без повторной оценки условий труда и измерения концентрации пыли. Приведённые баллы являются иллюстративными, а не результатами обследования реального предприятия. При практическом применении P и S должны устанавливаться на основе наблюдений, статистики происшествий, экспертной оценки и данных измерений. При наличии нормативных ограничений превышение допустимого уровня требует соответствующих корректирующих действий независимо от итогового балла матрицы.

Количественная оценка эффективности инженерных средств защиты. Эффективность технических мероприятий целесообразно оценивать сравнением показателей до и после их внедрения.

Для оценки снижения концентрации древесной пыли применяется формула:

$$E = (c_0 - c_1) / c_0 \times 100\ \%,$$

где E – относительное снижение концентрации, %; C_0 – концентрация до внедрения мероприятия; C_1 – концентрация после его внедрения.

Для корректного сравнения необходимо проводить измерения при сопоставимых технологических операциях, производительности оборудования, продолжительности работы и условиях вентиляции. Современные исследования подтверждают, что эффективность технических мер зависит от конкретного процесса. В лабораторных экспериментах, опубликованных в 2017 году, применение пылеудаления совместно со столом с нисходящим потоком воздуха снижало воздействие пыли при фрезеровании на 42,5 %, а при шлифовании – на 85,5 %. Эти результаты относятся к конкретным экспериментальным условиям и не могут рассматриваться как гарантированная эффективность оборудования на любом предприятии [15]. В исследовании 2025 года анализировались 23 предприятия. Увлажнение воздуха было связано со снижением среднего геометрического уровня воздействия вдыхаемой древесной пыли с 1,36 до 0,56 мг/м³, что соответствует относительному снижению примерно на 58,8 %. При этом наблюдались изменения воздействия других компонентов производственной среды, поэтому данная мера требует комплексной оценки, а не только контроля пыли [14]. Для расчёта эффективности конкретного мероприятия рекомендуется использовать таблицу регистрации измерений.

Таблица 3. Форма количественной оценки эффективности защитных мероприятий

Показатель	До внедрения	После внедрения	Способ оценки
Концентрация древесной пыли, мг/м³	C_0	C_1	Инструментальное измерение
Снижение концентрации, %	—	E	Расчёт по формуле
Уровень шума, дБА	L_0	L_1	Шумомер, сопоставимые условия

Показатель	До внедрения	После внедрения	Способ оценки
Число опасных ситуаций за период	N_0	N_1	Журнал регистрации
Доля исправных защитных устройств, %	A_0	A_1	Проверка оборудования
Доля работников, прошедших обучение, %	T_0	T_1	Журналы обучения и проверки знаний

Примечание: C_0, C_1, L_0, L_1, N_0, N_1, A_0, A_1, T_0 и T_1 – показатели, которые необходимо заполнить по результатам обследования предприятия. Таблица представляет форму сбора данных, а не готовые экспериментальные результаты.

Для механических опасностей следует учитывать не только количество зарегистрированных травм, но и число опасных ситуаций, результаты проверки защитных устройств и соблюдение безопасных процедур. При сравнении периодов необходимо учитывать продолжительность работы и объём выпускаемой продукции. Инженерные и организационные меры защиты. В распиловочных, строгальных и фрезерных цехах приоритетными мерами являются защитные ограждения, блокировки, аварийное отключение, безопасные приспособления для подачи заготовок и местная аспирация. При ремонте оборудования необходимо исключать его случайный запуск посредством надлежащего отключения и блокировки источников энергии.

При антисептической обработке и нанесении лакокрасочных покрытий необходимо учитывать свойства применяемых химических веществ, обеспечивать местную вытяжную вентиляцию, безопасное хранение материалов и подбор подходящих средств индивидуальной защиты на основании документации изготовителя. Для удаления древесной пыли предпочтительно улавливание непосредственно в месте образования. В исследовании британских предприятий выявлено, что операции шлифования, очистки и технического обслуживания могут создавать значительную пылевую нагрузку; авторы указали на необходимость улучшения систем местной вытяжной вентиляции и практик использования средств защиты органов дыхания [13].

Системы аспирации должны регулярно проверяться, а состояние фильтров, воздуховодов и соединений – контролироваться в рамках технического обслуживания. При этом рециркуляция воздуха и изменение влажности производственного помещения требуют оценки возможного влияния на пыль, летучие вещества и микробиологические компоненты [14].

Средства индивидуальной защиты применяются как дополнительный уровень защиты, когда опасность не удалось полностью устранить инженерными или организационными мерами. Их тип должен соответствовать конкретной опасности, условиям работы и результатам оценки риска.

Предлагаемая модель управления охраной труда. Предлагаемая модель состоит из шести последовательных этапов:

1. Выявление опасностей. Определение источников опасности для каждой технологической операции.

2. Оценка рисков. Определение вероятности события, тяжести последствий и приоритетности профилактических мер.

3. Инженерная защита. Устранение опасности или снижение воздействия с помощью ограждений, блокировок, аспирации и вентиляции.

4. Организационные мероприятия. Инструктажи, обучение, безопасные технологические процедуры и контроль доступа в опасные зоны.

5. Средства индивидуальной защиты. Подбор и применение СИЗ в соответствии с характером опасности.

6. Мониторинг и пересмотр. Повторные измерения, проверка оборудования, регистрация происшествий и корректировка оценки рисков.

Основное преимущество модели заключается в возможности связать выявленную опасность с конкретным показателем контроля и проверяемым профилактическим мероприятием. Повторная оценка позволяет определить, действительно ли внедрённая мера снизила риск.

Научная новизна. Научная новизна работы заключается в систематизации опасностей деревообрабатывающего производства по схеме «технологический процесс – источник опасности – последствия – показатель оценки – мера защиты» и разработке предлагаемого алгоритма предварительной балльной оценки профессиональных рисков.

Дополнительно предложена система показателей для сопоставления условий труда до и после внедрения инженерных мероприятий. В отличие от преимущественно описательного рассмотрения защитных средств, предложенный подход предусматривает проверку их эффективности по результатам повторных измерений и регистрации производственных событий.

Предложенная методика носит методический характер и требует апробации на конкретных деревообрабатывающих предприятиях.

Практическая значимость**.** Предложенные подходы могут использоваться при предварительной оценке профессиональных рисков, разработке локальных инструкций по охране труда, определении приоритетных мероприятий для распиловочных, строгальных, фрезерных и лакокрасочных цехов, а также при организации мониторинга производственной среды.

Формы таблиц позволяют собирать сопоставимые данные, рассчитывать снижение концентрации пыли, контролировать исправность защитных устройств и оценивать выполнение мероприятий по обучению работников.

Заключение

Обеспечение безопасности труда в деревообрабатывающих цехах требует комплексного подхода, учитывающего механические, физические, аэродисперсные, химические, электрические и пожаро-взрывоопасные факторы.

Для предварительного ранжирования опасностей предложено использовать матрицу профессионального риска, основанную на вероятности возникновения опасного события и тяжести его последствий. Данный подход позволяет определить приоритетные направления профилактики, однако должен дополняться инструментальными измерениями и анализом фактических производственных данных. Результаты современных исследований показывают, что воздействие древесной пыли зависит от вида технологической операции, организации уборки, состояния местной вытяжной вентиляции и применяемых технических средств.

Эффективность конкретных мероприятий необходимо проверять в условиях соответствующего предприятия, поскольку результаты отдельных исследований не могут автоматически переноситься на другие производственные объекты. Предложенная модель управления охраной труда объединяет выявление опасностей, оценку рисков, инженерную и организационную защиту, применение средств индивидуальной защиты и мониторинг. Её практическое применение позволит систематизировать профилактические мероприятия и создать основу для последующей апробации методики на деревообрабатывающих предприятиях Республики Узбекистан.

Список литературы

1. ГОСТ 12.3.042–88. Система стандартов безопасности труда. Производство деревообрабатывающее. Общие требования безопасности.
2. Приказ Министерства труда и социальной защиты населения Республики Узбекистан от 4 августа 2009 года № 44-Б. Правила по охране труда для работников деревообрабатывающего производства. Зарегистрирован Министерством юстиции Республики Узбекистан 4 сентября 2009 года, регистрационный № 2003.
3. Республика Узбекистан. Закон «Об охране труда» от 22 сентября 2016 года № ЗРУ-410.
4. Республика Узбекистан. Трудовой кодекс. Закон от 28 октября 2022 года № ЗРУ-798.
5. Chamba P.S., Baatjies R., Singh T.S., Cumbane A.J., Jeebhay M.F. Exposure Characterization of Wood Dust Particulate, Endotoxins, and (1–3)-β-d-Glucans, and Their Determinants in Mozambiquan Wood Processing Workers // Annals of Work Exposures and Health. – 2023. – T. 67, № 4. – P. 485–495. – DOI: 10.1093/annweh/wxac100.
6. I. Basinas [et al.]. Development of a quantitative North and Central European job exposure matrix for wood dust // Annals of Work Exposures and Health. – 2023. – T. 67, № 6. – P. 758–771. – DOI: 10.1093/annweh/wxad073.
7. Health and Safety Executive. Wood dust: Controlling the risk. WIS23 (rev3) [Электронный ресурс]. – 2022. URL: https://www.hse.gov.uk/PUBNS/wis23.htm (дата обращения: 17.10.2026).
8. Health and Safety Executive. Wood dust: Local exhaust ventilation and exposure control guidance for woodworking. WIS23 (rev3) [Электронный ресурс]. – 2022. URL: https://www.hse.gov.uk/PUBNS/wis23.htm (дата обращения: 17.10.2026).
9. ISO 45001:2018. Occupational health and safety management systems – Requirements with guidance for use. – Geneva: International Organization for Standardization, 2018.
10. Kargar-Shouroki F., Dehghan Banadkuki M.R., Jambarsang S., Emami A. The association between wood dust exposure and respiratory disorders and oxidative stress among furniture workers // Wiener klinische Wochenschrift. – 2022. – T. 134, № 13–14. – P. 529–537. – DOI: 10.1007/s00508-022-02048-5.
11. National Institute for Occupational Safety and Health. Engineering Controls Database: Wood Dust Control. Centers for Disease Control and Prevention [Электронный ресурс]. URL: https://www.cdc.gov/niosh/engcontrols/ (дата обращения: 17.10.2026).

12. Occupational Safety and Health Administration. Woodworking eTool: Plantwide Woodworking Hazards; Point of Operation; Wood Dust. U.S. Department of Labor [Электронный ресурс]. URL: https://www.osha.gov/etools/woodworking (дата обращения: 17.10.2026).
13. Simpson A.T., Beattie H., Lekka C., Keen C. Health and Safety Executive research on wood dust exposure controls in British manufacturing // Annals of Work Exposures and Health. – 2024. – T. 68, № 2. – P. 180–191. – DOI: 10.1093/annweh/wxad073.
14. Straumfors A., Pedersen I., Brinchmann E.Z. et al. Impact of air recirculation and humidification systems on wood dust exposure during woodworking // Annals of Work Exposures and Health. – 2025. – T. 69, № 6. – P. 652–664. – DOI: 10.1093/annweh/wxaf027.
15. Wood Dust in Joineries and Furniture Manufacturing: An Exposure Deter-minant and Intervention Study // Annals of Work Exposures and Health. – 2017. – T. 61, № 4. – P. 416–428. – DOI: 10.1093/annweh/wxx020.

References

1. GOST 12.3.042–88. [Occupational Safety Standards System. Woodworking production. General safety requirements] (In Russ.).
2. Prikaz Ministerstva truda i sotsial'noj zashchity naseleniya Respubliki Uzbekistan ot 4 avgusta 2009 goda № 44-B. [Labor protection rules for workers in woodworking production. Registered by the Ministry of Justice of the Republic of Uzbekistan on September 4, 2009, registration No. 2003] (In Russ.).
3. [Law “On Labor Protection” of September 22, 2016 No. ZRU-410] (In Russ.).
4. [Labor Code. Law of October 28, 2022 No. ZRU-798] (In Russ.).
5. Chamba P.S., Baatjies R., Singh T.S., Cumbane A.J., Jeebhay M.F. Exposure Characterization of Wood Dust Particulate, Endotoxins, and (1–3)-β-d-Glucans, and Their Determinants in Mozambiquan Wood Processing Workers // Annals of Work Exposures and Health. – 2023. – Vol. 67, No. 4. – P. 485–495. – DOI: 10.1093/annweh/wxac100.
6. Development of a quantitative North and Central European job exposure matrix for wood dust // Annals of Work Exposures and Health. – 2023. – Vol. 67, No. 6. – DOI: 10.1093/annweh/wxad073.
7. Health and Safety Executive. Wood dust: Controlling the risk. WIS23 (rev3) [Электронный ресурс]. – 2022. – URL: https://www.hse.gov.uk/PUBNS/wis23.htm (accessed: 17.10.2026).
8. Health and Safety Executive. Wood dust: Local exhaust ventilation and exposure control guidance for woodworking. WIS23 (rev3) [Электронный ресурс]. – 2022. – URL: https://www.hse.gov.uk/PUBNS/wis23.htm (accessed: 17.10.2026).
9. ISO 45001:2018. Occupational health and safety management systems – Requirements with guidance for use. – Geneva: International Organization for Standardization, 2018.
10. Kargar-Shouroki F., Dehghan Banadkuki M.R., Jambarsang S., Emami A. The association between wood dust exposure and respiratory disorders and oxidative stress among furniture workers // Wiener klinische Wochenschrift. – 2022. – Vol. 134, No. 13–14. – P. 529–537. – DOI: 10.1007/s00508-022-02048-5.

11. National Institute for Occupational Safety and Health. Engineering Controls Database: Wood Dust Control. Centers for Disease Control and Prevention [Электронный ресурс]. – URL: https://www.cdc.gov/niosh/engcontrols/ (accessed: 17.10.2026).
12. Occupational Safety and Health Administration. Woodworking eTool: Plantwide Woodworking Hazards; Point of Operation; Wood Dust. U.S. Department of Labor [Электронный ресурс]. – URL: https://www.osha.gov/etools/woodworking (accessed: 17.10.2026).
13. Simpson A.T., Beattie H., Lekka C., Keen C. Health and Safety Executive research on wood dust exposure controls in British manufacturing // Annals of Work Exposures and Health. – 2024. – Vol. 68, No. 2. – P. 180–191. – DOI: 10.1093/annweh/wxad073.
14. Straumfors A., Pedersen I., Brinchmann E.Z. et al. Impact of air recirculation and humidification systems on wood dust exposure during woodworking // Annals of Work Exposures and Health. – 2025. – Vol. 69, No. 6. – P. 652–664. – DOI: 10.1093/annweh/wxaf027.
15. Wood Dust in Joineries and Furniture Manufacturing: An Exposure Deter-minant and Intervention Study // Annals of Work Exposures and Health. – 2017. – Vol. 61, No. 4. – P. 416–428. – DOI: 10.1093/annweh/wxx020.

ARTICLES IN ENGLISH

INFORMATION AND DIGITAL TECHNOLOGIES

COMPUTER SCIENCE, COMPUTING AND CONTROL

Received: 11.10.2026
Accepted: 18.10.2026
Published: 28.10.2026

УДК 004.8+658.3+519.816

DOI: 10.32743/UniTech.2026.151.10.23576

Classification of candidate information uncertainty in AI-based resume screening

Babayev Samir Cahid
PhD student
Azerbaijan State Oil and Industry University
Azerbaijan, Baku
E-mail: samircbabayev@gmail.com

Классификация неопределённости сведений о кандидатах при отборе резюме с использованием искусственного интеллекта

Бабаев Самир Джахид
аспирант
Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности
Азербайджанская Республика, г. Баку

Abstract

Large language models and multi-criteria decision methods rank job applicants from resumes, although resume content is written by the applicant and can be verified only in part. The aim of the study is to classify how AI-based resume screening represents the uncertainty of candidate information and to derive research gaps and design requirements from this classification. Five methods closest to pre-interview shortlisting are described and compared on five criteria that follow

Библиографическое описание: Бабаев С.Д. Классификация неопределённости сведений о кандидатах при отборе резюме с использованием искусственного интеллекта // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23576

For citation: Babayev S.C. Classification of candidate information uncertainty in AI-based resume screening // Universum: Technical Sciences : electronic scientific journal. 2026. No. 10(151). Available at: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23576

the path from a resume claim to a rank: the form of the criterion score, the representation of uncertainty, the treatment of claim reliability, the ranking procedure and the possibility of asking the candidate. The proposed classification crosses two types of uncertainty, the imprecision of a value and the reliability of a claim, with three sources, the candidate, the language model that extracts the data and the evaluator. In the compared methods reliability is either absent or expresses the evaluator's confidence, and language-model pipelines accept resume content as given, so two of the six cells of the classification have no modelling device. Four gaps are stated as research questions, and provisions of the EU AI Act on high-risk recruitment systems are translated into verifiable design requirements. The classification and the requirements can serve as a checklist for selecting and auditing screening tools.

Аннотация

Большие языковые модели и методы многокритериального принятия решений применяются для ранжирования соискателей по резюме, хотя содержание резюме формирует сам соискатель и проверить его удаётся лишь частично. Цель исследования состоит в том, чтобы классифицировать способы представления неопределённости сведений о кандидате в системах отбора резюме на основе искусственного интеллекта и вывести из этой классификации исследовательские пробелы и требования к проектированию. Описаны пять методов, наиболее близких к формированию списка кандидатов на собеседование, и проведено их сопоставление по пяти критериям, отражающим путь от утверждения в резюме до места в рейтинге: форма оценки по критерию, представление неопределённости, учёт достоверности утверждений, процедура ранжирования и возможность запросить сведения у кандидата. Предложена классификация, в которой два типа неопределённости, неточность значения и недостоверность утверждения, сопоставлены с тремя источниками, а именно кандидатом, языковой моделью, извлекающей данные, и экспертом. В рассмотренных методах достоверность либо не учитывается, либо выражает уверенность эксперта, а системы на основе языковых моделей принимают содержание резюме без проверки, поэтому для двух из шести ячеек классификации средства моделирования отсутствуют. Четыре выявленных пробела сформулированы как исследовательские вопросы, а положения Регламента ЕС об искусственном интеллекте о системах найма высокого риска переведены в проверяемые требования к проектированию. Классификация и требования могут служить контрольным перечнем при выборе и аудите систем отбора резюме.

Keywords: resume screening, candidate information reliability, large language models, multi-criteria decision making, fuzzy numbers, Z-numbers, EU AI Act.

Ключевые слова: отбор резюме, достоверность сведений о кандидате, большие языковые модели, многокритериальное принятие решений, нечёткие числа, Z-числа, Регламент ЕС об искусственном интеллекте.

1. Introduction

Resume content is written by the applicant, and respondents admit to some degree of exaggeration (72 %), omission (61 %) and fabrication (31 %) in resumes, and organisations verify only selected items [4]. The same study shows that deception in resumes is not a rare anomaly but a measurable behaviour that differs between applicants [4]. A screening method that treats every statement in a resume as a fact therefore ranks claims rather than verified qualifications.

Multi-criteria decision making has become the standard tool for ranking candidates, and TOPSIS and its variants are used in half of the personnel-selection studies covered by a recent systematic review [8]. In this line of work the uncertainty of a rating is usually modelled with fuzzy numbers. Alguliyev et al. convert linguistic expert ratings into triangular fuzzy numbers and rank candidates with a modified fuzzy VIKOR method [1], and Öztürk and Kaya apply fuzzy VIKOR to personnel selection in an automotive supplier [9]. In both cases the fuzziness describes how precisely the expert can express a judgement, while the information on which the judgement rests is taken as correct. Existing reviews of AI in recruitment address its ethics and its use in employee recruitment [2, 6]. They discuss fairness, transparency and acceptance by applicants, but do not ask how screening methods represent the possibility that a claim in the resume is not true.

Zadeh introduced Z-numbers as a pair of a fuzzy restriction and a measure of its reliability [15], which in principle offers a device for the second kind of uncertainty. Gottwald et al. use Z-numbers in personnel selection, but the reliability component there expresses how confident the evaluator is in the rating [3], not whether the candidate's statement is true. Language models shift the problem to an earlier stage. Hoque et al. let a language model classify profile text into classes that are mapped to fixed fuzzy numbers and ranked by fuzzy TOPSIS [5], so the content of the profile enters the ranking without any check. Stuart et al. take the opposite direction and build an interview system that keeps a belief over rubric levels and asks the candidate for missing information [13], yet this system does not rank candidates. The human reviewer is not a reliable safeguard either, since in an experiment people followed the preferences of a biased model in up to 90 % of decisions [14].

The legal context makes the question practical. Annex III, point 4(a), of the AI Act classifies systems intended to analyse and filter job applications and to evaluate candidates as high-risk, and the Act attaches obligations on data, logging, transparency, human oversight and robustness to such systems [11, 12]. Article 22 of the GDPR and the Azerbaijani law on personal data add protection against decisions based solely on automated processing [7, 10]. Table 1 shows that these obligations can be stated as concrete requirements for a pre-interview screening tool, and several of them concern exactly how the tool handles claims and their evidence.

Table 1. Provisions of the AI Act and verifiable design requirements for a pre-interview screening tool

Provision	Design requirement
Art. 10(2)(f)–(g), bias in data	An annotated test set of known origin is used for name and attribute substitution tests after each model or prompt change
Art. 12(1)–(2), 26(6), logs	Each extracted claim, its evidence, the model version, each rank and each recruiter action are logged and kept for at least six months
Art. 13(1), 13(3)(b), transparency	The interface shows each claim with its evidence and score uncertainty, and the instructions state the measured extraction accuracy

Provision	Design requirement
Art. 14(4)(b), (d), (e), oversight	The recruiter can override any rank with a logged reason, and no candidate is rejected without a human action
Art. 15(1), (5), robustness	Resumes with hidden prompts are tested before deployment, and extracted evidence must appear in the visible text

Taken together, the sources show three separate lines of work, fuzzy multi-criteria ranking, language-model screening and regulation, none of which treats the truth of a resume claim as a quantity to be modelled. The aim of the study is to classify how AI-based resume screening represents the uncertainty of candidate information and to derive research gaps and design requirements from this classification.

2. Materials and Methods

The analysis draws on the studies of personnel selection, multi-criteria ranking and AI-based recruitment listed in the references. No systematic database search was carried out, so the comparison is narrative rather than systematic. From these studies, five methods closest to the formation of an interview shortlist were selected, that is, methods that turn information about each applicant into a score and either rank the applicants or collect information for ranking them. Regulation (EU) 2024/1689 and its amendment by Regulation (EU) 2026/1744 were read in the Official Journal text on EUR-Lex on 10 October 2026 [11, 12].

The modified fuzzy VIKOR method of Alguliyev et al. [1] expresses expert linguistic ratings of candidates as triangular fuzzy numbers and selects the candidate that is closest to the ideal in the sense of a compromise between group utility and the largest individual shortfall. Öztürk and Kaya [9] solve the same selection problem with fuzzy VIKOR on expert ratings of candidates in the automotive supply industry. Gottwald et al. [3] rate candidates with Z-numbers, in which each fuzzy rating is accompanied by a fuzzy reliability given by the evaluator, and rank them with fuzzy AROMAN. Hoque et al. [5] use a language model to read candidate profiles and assign them to classes, map the classes to fixed fuzzy numbers and rank the candidates with fuzzy TOPSIS. Stuart et al. [13] do not rank candidates but conduct an automatic interview that keeps a probability distribution over rubric levels and chooses questions that elicit the missing information.

The purpose of the comparison is narrower than the aim of the study. It is to establish, for each method, where the uncertainty of candidate information enters the selection procedure and whether the truth of a claim can be represented at all. The five criteria in Table 2 follow the path of a claim from the resume to the shortlist. The criterion score shows what the method actually evaluates, an expert rating, a model output or a belief. The uncertainty representation shows which formal device carries imprecision. The reliability of claims is the property under study and shows whether doubt about a statement is represented and whose doubt it is. The ranking procedure shows whether the method produces a shortlist, and the last criterion shows whether the method can reduce uncertainty by asking the candidate. Together the criteria are sufficient to place each method in the classification of Section 3.2.

3. Results and Discussion

3.1. Comparison of the closest methods

Table 2. Comparison of methods closest to pre-interview shortlisting

Work	Criterion score	Uncertainty	Reliability of claims	Ranking	Asks the candidate
Alguliyev [1]	Expert linguistic ratings	Triangular fuzzy numbers	Not considered	Modified fuzzy VIKOR	No
Öztürk [9]	Expert ratings	Fuzzy numbers	Not considered	Fuzzy VIKOR	No
Gottwald [3]	Expert ratings with reliability	Z-numbers	Evaluator's confidence	Fuzzy AROMAN	No
Hoque [5]	Language-model classes	Fixed fuzzy numbers	Content accepted as given	Fuzzy TOPSIS	No
Stuart [13]	Belief over rubric levels	Probabilities over levels	Honesty not modelled	No	Yes

The Z-number method is the only one with an explicit reliability component, but it expresses the hesitation of the person who rates [3]. The language-model hybrid takes the profile text as given [5]. Table 2 thus shows that the five methods differ in the device used for imprecision, but agree in that none of them represents the possibility that the candidate's claim is untrue. The only method that requests information from the candidate does not rank, and the ranking methods do not request information.

3.2. Classification by type and source of uncertainty

Fig. 1 crosses two types of uncertainty, the approximate knowledge of a value (imprecision) and the doubt whether a claim is true (reliability), with three sources.

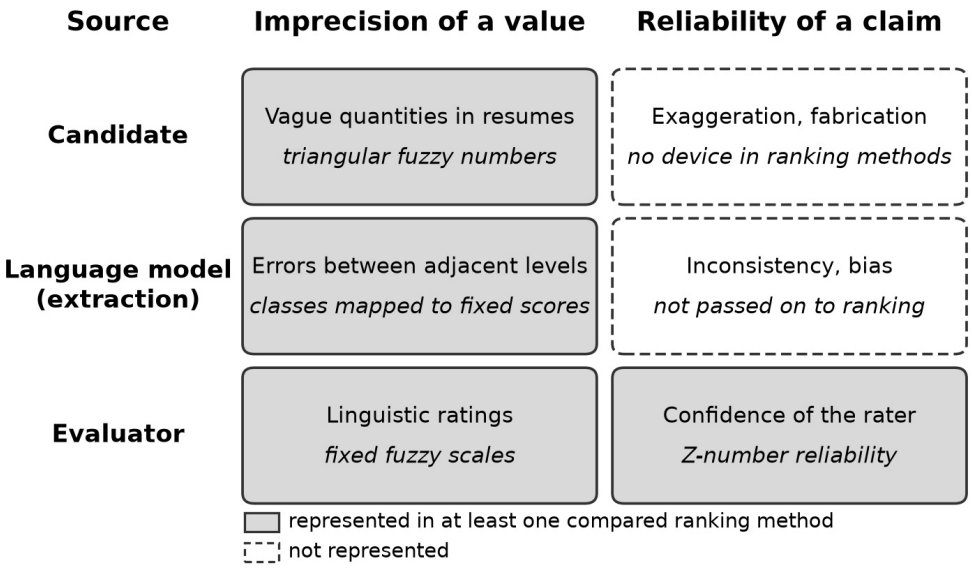


Figure 1. Two types and three sources of uncertainty in candidate information

Most ranking methods place uncertainty in the evaluator row and treat it as imprecision. No compared ranking method represents whether a claim is true, although Z-numbers provide a device for it [15]. The uncertainty of language-model extraction is not passed on to the ranking.

Figure 1 is built from the columns of Table 2. The column of uncertainty representation fills the imprecision cells. Fuzzy VIKOR [1, 9] and the Z-number method [3] place it in the evaluator row through linguistic ratings on fixed fuzzy scales, and the language-model hybrid [5] places it in the extraction row through classes mapped to fixed scores. The candidate cell of the imprecision column can in principle be covered by the same fuzzy numbers, but in the compared methods they express the evaluator's judgement rather than the imprecise value that the candidate states, so this cell also remains open in practice. The column of claim reliability fills the reliability cells. Only the Z-number method has an entry there, and it belongs to the evaluator row, while the entries “not considered”, “content accepted as given” and “honesty not modelled” leave the candidate and extraction cells empty. The main finding of the comparison is therefore that the cell of the candidate's reliability, which corresponds to the exaggeration and fabrication reported in [4], has no device in any compared ranking method.

3.3. Research gaps and questions

The first gap is that no compared method measures how far a claim is supported by evidence in the resume [3, 5, 13]. RQ1 asks how this support can be measured and turned into a fuzzy or probabilistic score. The second gap is that fuzzy parameters come from fixed linguistic tables or expert judgement and do not differ between candidates [3, 5]. RQ2 asks whether candidate-specific parameters derived from claims and evidence rank candidates more accurately.

The third gap is that the ranking methods do not request additional information, while the system that requests it does not rank [1, 3, 5, 9, 13]. RQ3 asks which information should be requested from which candidate so that verification changes the interview shortlist most. The fourth gap is that the methods were tested on 100 profiles, four candidates or simulated candidates [3, 5, 13]. RQ4 asks how the methods perform on real resumes with annotated claims and evidence.

3.4. From legal provisions to design requirements

As noted in Section 1, resume screening systems are high-risk under Annex III, point 4(a), of the AI Act [11]. Regulation (EU) 2026/1744 amends Article 10, leaves Articles 12–15 and 26 unchanged and moves the date of application for such systems to 2 December 2027 [12]. The five requirements in Table 1 (Section 1) follow most directly from the classification, because each of them concerns a claim, its evidence or the uncertainty of its score.

The requirements specify what the recruiter sees and can change, both because Article 22 of the GDPR and Article 7.3 of the Azerbaijani law on personal data protect the data subject against decisions based solely on automated processing [7, 10] and because people followed the preferences of a biased model in up to 90 % of decisions in an experiment [14].

4. Conclusion

The study classified the uncertainty of candidate information in AI-based resume screening by two types, the imprecision of a value and the reliability of a claim, and by three sources, the candidate, the language model and the evaluator. The comparison of five methods closest to

shortlisting showed that the imprecision of values is covered by fuzzy devices, whereas the reliability of what the candidate writes has no modelling device in the compared ranking methods, and the uncertainty of language-model extraction is not passed on to the ranking. Four research questions follow from these gaps, on the support of claims by evidence, candidate-specific fuzzy parameters, the choice of information to verify and testing on real annotated resumes. The AI Act provisions on high-risk recruitment systems were translated into five verifiable requirements that link the classification to the design and audit of screening tools. The comparison is narrative and was coded by one person, so the gaps may not hold for every published method.

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. Dadaboyev S.M.U., Abdullayeva J., Abbosova N., Suleymenova A., Mamadjanova K. Role of artificial intelligence in employee recruitment: systematic review and future research directions // Discover Global Society. – 2025. – Vol. 3. – DOI: 10.1007/s44282-025-00246-w.
3. Gottwald D. Chocholáč J., Kayacı Çodur M., Čubranić-Dobrodolac M., Yazir K. Z-numbers-based MCDM approach for personnel selection at institutions of higher education for transportation // Mathematics. – 2024. – Vol. 12, No. 4. – Art. 523. – DOI: 10.3390/math12040523.
4. Henle C.A., Dineen B.R., Duffy M.K. Assessing intentional resume deception: Development and nomological network of a resume fraud measure // Journal of Business and Psychology. – 2019. – Vol. 34, No. 1. – P. 87–106. – DOI: 10.1007/s10869-017-9527-4.
5. Hoque S., Karim A.A.J., Alam M.G.R., Gope N. When LLM meets Fuzzy-TOPSIS for personnel selection through automated profile analysis // arXiv preprint arXiv:2601.22433. – 2026. – DOI: 10.48550/arXiv.2601.22433.
6. Hunkenschroer A.L., Luetge C. Ethics of AI-enabled recruiting and selection: A review and research agenda // Journal of Business Ethics. – 2022. – Vol. 178, No. 4. – P. 977–1007. – DOI: 10.1007/s10551-022-05049-6.
7. Law of the Republic of Azerbaijan “On personal data” No. 998-IIIQ of 11 May 2010 (In Azerbaijani).
8. 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.
9. Öztürk F., Kaya G.K. Bulanık VIKOR ile personel seçimi: Otomotiv yan sanayinde uygulama [Personnel selection with fuzzy VIKOR: An application in the automotive supply industry] // Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji. – 2020. – Vol. 8, No. 1. – P. 94–108. – DOI: 10.29109/gujsc.595288.
10. Regulation (EU) 2016/679 of the European Parliament and of the Council of 27 April 2016 (General Data Protection Regulation) // Official Journal of the European Union. – 2016. – P. 1–88. – URL: http://data.europa.eu/eli/reg/2016/679/oj (accessed: 10.10.2026).

11. Regulation (EU) 2024/1689 of the European Parliament and of the Council of 13 June 2024 (Artificial Intelligence Act) // Official Journal of the European Union. – 2024. – No. 12 [Электронный ресурс]. – URL: http://data.europa.eu/eli/reg/2024/1689/oj (accessed: 10.10.2026).
12. Regulation (EU) 2026/1744 of the European Parliament and of the Council of 8 July 2026 amending Regulation (EU) 2024/1689 and other acts (Digital Omnibus on AI) [Электронный ресурс]. // Official Journal of the European Union. – URL: http://data.europa.eu/eli/reg/2026/1744/oj (accessed: 10.10.2026).
13. Stuart H., Kaneko M., Baldwin T. Beyond the Resumé: A rubric-aware automatic interview system for information elicitation // arXiv preprint arXiv:2603.01775. – 2026. – DOI: 10.48550/arXiv.2603.01775.
14. Wilson K., Sim M., Gueorguieva A.-M., Caliskan A. No thoughts just AI: Biased LLM hiring recommendations alter human decision making and limit human autonomy // Proceedings of the AAAI/ACM Conference on AI, Ethics, and Society. – 2025. – Vol. 8, No. 3. – P. 2692–2704. – DOI: 10.1609/aies.v8i3.36749.
15. Zadeh L.A. A note on Z-numbers // Information Sciences. – 2011. – Vol. 181, No. 14. – P. 2923–2932. – DOI: 10.1016/j.ins.2011.02.022.

Received: 09.10.2026
Accepted: 15.10.2026
Published: 28.10.2026

УДК 004.8+004.5

DOI: 10.32743/UniTech.2026.151.10.23574

Prospects for transforming user experience in web interfaces with ai assistants based on the Model Context Protocol

Poliantsev Iurii
Senior software engineer at Cyberdesk
Germany, Munich
E-mail: yuripolantsev@gmail.com

Перспективы преобразования пользовательского опыта в веб-интерфейсах с AI-ассистентами на базе Model Context Protocol

Полянцев Юрий Васильевич
старший инженер-программист в Cyberdesk
Германия, г. Мюнхен

Abstract

This study is devoted to examining the possibilities of a radical transformation of user experience (UX) through the integration of AI assistants into web interfaces relying on the Model Context Protocol (MCP). The aim of the work is to substantiate the internal structure of MCP and to analyze how it may influence UX metrics. As the methodological basis, a systematic review of current scientific literature in the fields of human–machine interaction, language model architecture and UX design was employed, supplemented by techniques of predictive modeling. The scientific novelty of the research lies in the proposal of a four-level MCP architecture, which includes session, historical, global and proactive context levels in order to overcome the context window limitations and the lack of long-term memory in modern AI assistants. The results demonstrate that the implementation of MCP can enhance the relevance of system-generated responses, accelerate the completion of user tasks and improve overall interaction satisfaction while simultaneously reducing cognitive load. The predictive models presented in the work indicate a potential increase in key UX indicators when transitioning from traditional architectures to systems built according to MCP

Библиографическое описание: Полянцев Ю.В. Перспективы преобразования пользовательского опыта в веб-интерфейсах с AI-ассистентами на базе Model Context Protocol // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23574

For citation: Poliantsev I. Prospects for transforming user experience in web interfaces with ai assistants based on the model context protocol // Universum: Technical Sciences : electronic scientific journal. 2026. No. 10(151). Available at: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23574

principles. The conclusions obtained are of interest to developers of AI solutions, UX/UI designers, researchers in the field of HCI and product managers focused on creating more intuitive and personalized next-generation digital assistants.

Аннотация

В настоящем исследовании рассматриваются возможности радикальной трансформации пользовательского опыта (UX) за счёт интеграции ИИ-ассистентов в веб-интерфейсы с опорой на Протокол Контекста Модели (ПКМ). Цель работы — обосновать внутреннюю структуру ПКМ и проанализировать её влияние на UX-метрики. Методологической основой стал систематический обзор современной научной литературы в области «человек–машина», архитектуры языковых моделей и UX-дизайна, дополненный методами предиктивного моделирования. Научная новизна исследования заключается в предложении четырёхуровневой архитектуры ПКМ, включающей сессионный, исторический, глобальный и проактивный уровни контекста для преодоления ограничений контекстного окна и отсутствия долговременной памяти в современных ИИ-ассистентах. Результаты демонстрируют, что реализация ПКМ может повысить релевантность ответов системы, ускорить выполнение пользовательских задач и улучшить общее удовлетворение взаимодействием при одновременном снижении когнитивной нагрузки. Представленные предиктивные модели указывают на потенциальный рост ключевых UX-показателей при переходе от традиционных архитектур к системам, построенным по принципам ПКМ. Полученные выводы будут интересны разработчикам ИИ-решений, UX/UI-дизайнерам, исследователям в области взаимодействия человек–машина и продакт-менеджерам, ориентированным на создание более интуитивных и персонализированных цифровых ассистентов следующего поколения.

Keywords: artificial intelligence, user experience, AI assistant, Model Context Protocol, web interface, context management, large language models, personalization, human–machine interaction, proactive interface.

Ключевые слова: искусственный интеллект, пользовательский опыт, ИИ-ассистент, Протокол Контекста Модели, веб-интерфейс, управление контекстом, крупные языковые модели, персонализация, взаимодействие человек–машина, проактивный интерфейс.

Introduction

The integration of artificial intelligence algorithms into digital products has long transcended trial implementations and now represents one of the key factors determining the level of competitiveness and the quality of the user experience (UX). Embedding AI assistants directly into web interfaces opens fundamentally new opportunities: from automating routine tasks and dynamically personalizing content to optimizing the overall interaction flow. According to estimates, the global chatbot market was valued at US $7.76 billion in 2024 and is projected to reach US $27.29 billion by 2030, with a compound annual growth rate of 23.3 % from 2025 to 2030 [7]. Such rapid expansion is inextricably linked not only to the evolution of large language models

but also to the increased demand for intelligent, seamless interface solutions. Current UI/UX design trends for 2024 emphasize hyperpersonalization, wherein algorithms analyze user behavior in real time and propose maximally adapted interaction scenarios [8].

Despite apparent progress, existing AI-assistants face fundamental limitations that hinder their further development. The principal limitation is fragmented context management: most systems are constrained by the capacity of short-term memory, which leads to loss of information from previous sessions, inability to account for long-term preferences and lack of proactivity. As a result, the dialogue loses coherence, the user must repeat information already provided and overall satisfaction markedly declines. In the scientific community an unresolved issue remains the absence of a unified methodology or protocol for multi-level context management that systemically addresses the problem of fragmented interaction data.

The objective of this work is to substantiate the internal structure of MCP and to conduct an analysis of how it can influence UX-metrics.

The scientific novelty of the research lies in the proposal of a four-level MCP architecture, which includes session, historical, global and proactive context levels in order to overcome the limitations of the context window and the absence of long-term memory in modern AI-assistants.

The proposed authorial hypothesis states that implementation of AI-assistants based on MCP will ensure a statistically significant improvement in key UX-metrics — task success, user satisfaction and reduction of cognitive load — compared with existing models of artificial intelligence integration.

Materials and Methods

In recent years research in the field of web interfaces integrating AI assistants based on the Model Context Protocol (MCP) has evolved along several directions which can be conventionally divided into four clusters: 1) theoretical foundations and systematic reviews, 2) autonomous and multi-agent systems, 3) UX/UI solutions in generative AI and 4) applied and market aspects.

In the first cluster there are summarizing works that analyze the objectives, technologies and challenges of creating conversational agents and large language models. Allouch M., Azaria A., Azoulay R. [3] propose a broad classification of objectives (communication, informational, entertainment) and technologies (rule-based, ML, hybrid approaches) and outline the main challenges from ensuring response reliability to constructing long-term user scenarios. Bin Sawad A., et al. [2] systematically examine medical chat-bots for chronic diseases demonstrating how NLP-based architectures combine with user protocols for anamnesis data collection and condition monitoring and indicate the need for flexible adaptation of responses to patient context. Hadi M.U., et al. [4] and subsequently in 2024 Patil R., Gudivada V. [6] focus on LLMs on algorithmic trends (transformers, parameter optimization methods, knowledge distillation) as well as limitations (bias, safety, computational cost) and prospects (domain-specific models, multimodality).

In the second cluster the key developments are autonomous agents and their cooperation. Garg P., Beeram D. [5] describe the architecture of autonomous agents based on LLMs capable of independent task planning and interaction with external APIs while emphasizing the need for protocols to verify action correctness and prevent hallucinations. De Zarzà I., et al. [9] demonstrate

how multi-agent simulations with LLMs can generate collective adaptation strategies however they note issues of inevitable growth in communication channel complexity and the need for centralized control.

The third cluster unites UX/UI research for generative AI. Kim T., et al. [8] propose a taxonomy of interface elements contextual prompts, embeddable widgets, adaptive control panels and identify main trends including model transparency, explainability mechanisms and integration into workflows. Nama P. [10] examining mobile applications with AI functionality emphasizes the importance of context-aware services using geolocation and behavioral patterns as well as flexible UX metrics for real-time user satisfaction assessment.

In the fourth cluster applied and market research is represented. Grand View Research [7] forecasts rapid growth of the chat-bot market in the B2B and e-commerce segments by 2030 highlighting key drivers digital transformation of companies and increased demand for personalized service. Lotfian M., Ingensand J., Brovelli M.A. [1] address the issue of user engagement through crowdsourcing UI tools and assess risks related to the quality of collected data which can be adapted for MCP interfaces with the aim of increasing trust and engagement.

Thus the authors employ diverse approaches: from systematic reviews of LLM architectures and algorithms to UX research and economic forecasting. Contradictions are evident: some works, for example [3, 6], emphasize the theoretical capabilities of models, others [2, 10], highlight applied limitations and user scenarios; a number of authors, [5, 9], accentuate agent autonomy, whereas [8, 10] call for strict control of the model via the interface. Certain issues remain underexplored: transparency of internal states of LLMs in real web interfaces, standards for context exchange protocols between agent and UI, as well as methods for evaluating long-term user satisfaction and managing hallucination risks in production systems.

Results and Discussion

Based on a comprehensive analysis of current limitations of AI assistants and the gap identified in the scientific literature, a conceptual architecture of the Model Context Protocol (MCP) is presented. MCP functions as a multi-layered system for managing data on user–interface interactions, designed to ensure dialogue integrity, response personalization, and proactive behavior of the AI assistant. The protocol is composed of four interrelated levels, as illustrated in Figure 1.

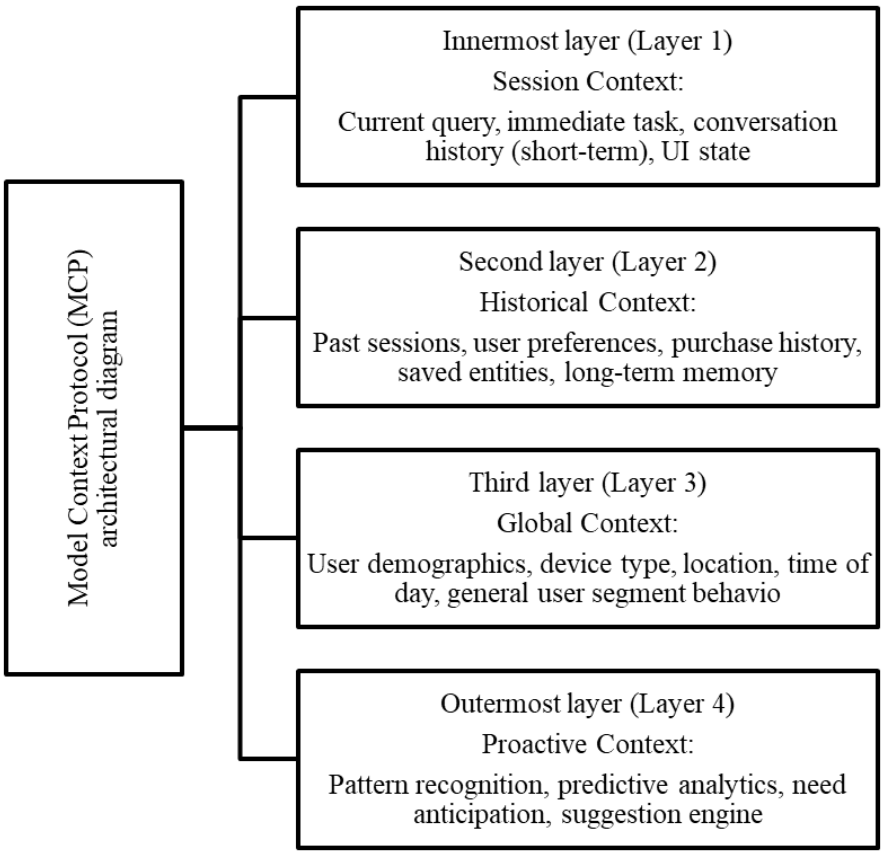


Figure 1. Model Context Protocol (MCP) architectural diagram [2, 4, 10]

Level 1: Session context — the most immediate and time-bound layer, accumulating data exclusively about the current interaction: the dialogue history within the active session, the state of interface elements with which the user is interacting, and the immediate objective of the task being performed. This ensures pinpoint relevance of responses and smooth dialogue flow.

Level 2: Historical context — the accumulation of information from previous sessions, including purchase and browsing history, lists of frequently asked questions, and saved preferences (for example, prefer airlines with free baggage). This component forms the basis for long-term personalization, eliminating the need to repeat the same data each time and thereby improving service quality [9].

Level 3: Global context — a relatively stable set of user characteristics: demographic parameters (if known), device type, geographical location, local time of day, and interface language. Additionally, generalized behavioral models of similar user groups may be taken into account, enabling adequate assumptions even with a limited volume of personal data.

Level 4: Proactive context — the most innovative element of MCP, performing cognitive synthesis of information from the three previous levels to identify patterns and predict requests. For example, if the user has repeatedly searched for hotels in the same city on similar dates (historical context) and has reactivated a session (session context), the system can suggest: Plan a trip to [City] during [Dates]? New highly rated options have been found [6, 8].

Implementation of MCP fundamentally changes the interaction logic — for clarity a comparison of the levels is presented in the diagram (see Figure 2).

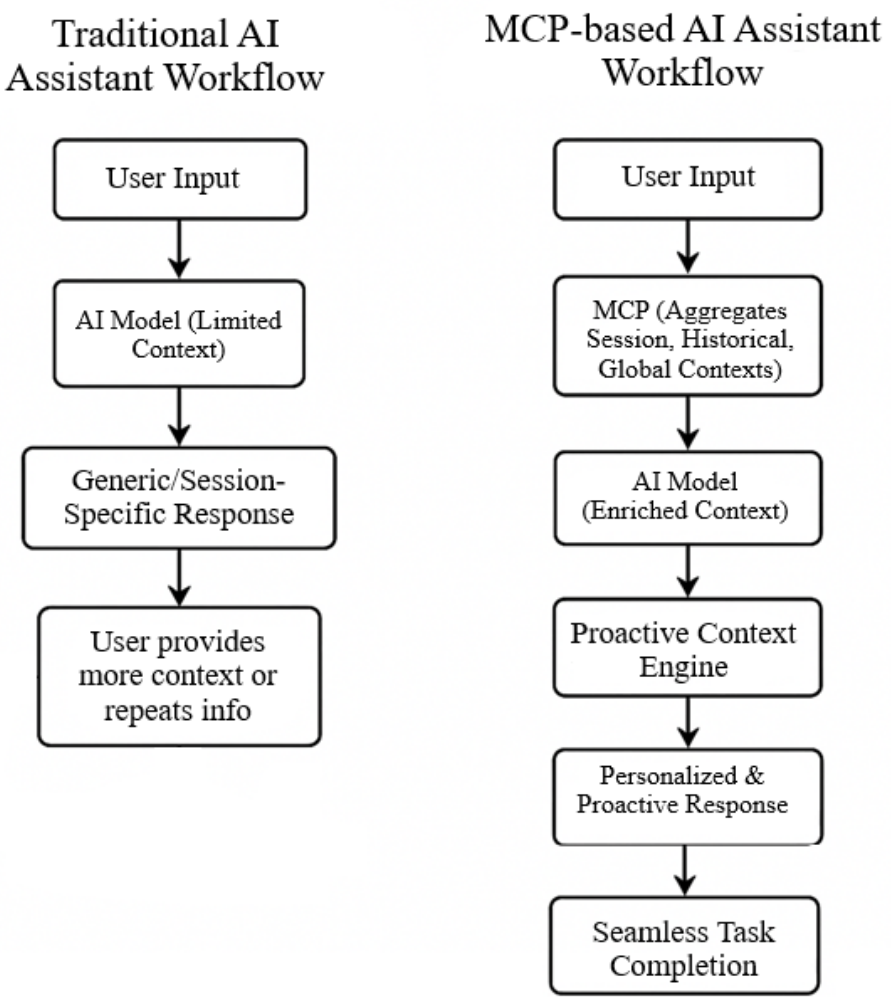


Figure 2. Comparative diagram of interaction flows: Traditional AI vs. MCP-based AI [1, 6, 8]

In the classical approach the user is forced to independently maintain and update the dialogue context, whereas in an MCP-based system the entire cognitive burden of accumulating and structuring information is shifted to the platform, which enriches each incoming request with multi-level data before passing it to the language model. This not only ensures accurate responses but also enables the uncovering of latent intentions, the anticipation of subsequent actions and the suggestion of the most relevant solutions. Predictive modeling based on empirical data from related studies on personalization and contextualization allows for the assessment of the potential impact of MCP on key UX-metrics [6, 8].

One of the fundamental advantages of the MCP architecture is its ability to effectively manage the cognitive load of the end user as task complexity increases. Unlike traditional virtual assistants, which proportionally increase the requirements for the volume of context transmitted by the user with the growth of query complexity, an MCP-based system leverages previously accumulated contextual data to decompose complex tasks and radically simplify them [3, 5].

Analysis of the obtained data convincingly demonstrates that the implementation of a systemic approach to context management, realized through the Model Context Protocol, represents not simply an evolutionary extension but a fundamentally new stage in the development of AI-assistants. Transcending the fundamental limitations of modern LLMs — the loss of contextual memory between sessions and the absence of proactive behavior — MCP forms the foundation for

the next generation of web interfaces. Such interfaces will be characterized not by the formal presence of a chat window but by the comprehensive integration of an intelligent agent at all stages of the user journey. At the same time, the implementation of MCP is associated with significant challenges: it requires high computational resources for storing and processing multi-level context and raises issues of ensuring the confidentiality and security of user data through advanced anonymization and access control mechanisms, which corresponds to the approaches of AI TRiSM (AI Trust, Risk and Security Management) [10].

The following Table 1 reflects the advantages, disadvantages, and future trends in transforming user experience in web interfaces with AI assistants based on the Model Context Protocol

Table 1. Advantages, disadvantages and future trends in transforming user experience in web interfaces with AI assistants based on the Model Context Protocol [2, 8, 10]

Advantages	Disadvantages	Future trends
• Contextual personalization: the assistant takes into account interaction history, preferences and the user's current state, providing relevant recommendations • Process acceleration: automation of routine tasks (form filling, site navigation) reduces completion time • Reduction of cognitive load: the user need only engage in a brief dialogue with the assistant rather than remember numerous commands • 24/7 availability: round-the-clock support without human intervention • Natural interface: voice and text dialogues render interaction more intuitive	• Security and privacy issues: storage and transmission of contextual data create risks of leakage or misuse of personal information • Complexity of integration: implementation of the Model Context Protocol requires deep expertise in ML/AI and server-side infrastructure development • Processing delays: analysis of large volumes of contextual data may introduce noticeable response latency • Quality instability: errors in context interpretation lead to irrelevant responses• Lack of unified standards: numerous proprietary solutions hinder compatibility across platforms	• Multimodality: integration of voice, text, image and gesture inputs for more comprehensive context analysis • Privacy by design: advancement of federated learning and homomorphic encryption to protect user data • Proactive assistants: predicting user needs and initiating actions without explicit requests • Integration with AR/VR and IoT: delivery of context-aware prompts directly within augmented reality and smart devices • Protocol standardization: emergence of open APIs and unified specifications for context information exchange

Thus, the research results confirm the initial hypothesis: the theoretically constructed architecture of the Model Context Protocol demonstrates significant potential for transforming user experience. Predictive models based on the analysis of existing data indicate the possibility of a radical increase in key UX-metrics. In the future, it is advisable to focus efforts on the practical implementation and empirical validation of the proposed protocol in real web applications to verify the theoretical conclusions drawn.

Conclusion

A broad analysis of contemporary scientific literature confirmed the relevance of the problem and revealed an existing gap in research due to the absence of a systemic approach to the management of multi-level context.

As a key achievement, an original four-level architecture of the Model Context Protocol (MCP) is proposed, comprising:

– the session level, responsible for current communication;

– the historical level, aggregating accumulated interaction data;

– the global level, forming a generalized model of user preferences and behavior;

– the proactive level, implementing prediction and initiative proposal of actions.

This construct represents scientific novelty and is designed to overcome the fundamental limitations of existing AI-assistants, such as the limitation of the context window and the absence of mechanisms for long-term memory retention. The implementation of MCP shifts the primary cognitive load for maintaining relevant context from the user to the system, ensuring a more natural, efficient and satisfactory interaction.

The practical significance of this work lies in that the MCP concept can serve as a roadmap for developers and UX designers in the creation of a new generation of intelligent web interfaces. Despite technical challenges related to computational complexity and issues of ensuring data security, the benefits of creating truly understanding and proactive assistants justify further investments in the development of this direction. In the long term, the Model Context Protocol may become a key paradigm defining the future of human-machine interaction in the digital environment.

References

1. Lotfian, M. The partnership of citizen science and machine learning: benefits, risks, and future challenges for engagement, data collection, and data quality / M. Lotfian, J. Ingensand, M.A. Brovelli // Sustainability. – 2021. – Vol. 13, No. 14. – P. 1–19. – DOI: 10.3390/su13148087.
2. Bin Sawad, A. A systematic review on healthcare artificial intelligent conversational agents for chronic conditions / A. Bin Sawad [et al.] // Sensors. – 2022. – Vol. 22, No. 7. – P. 1–20. – DOI: 10.3390/s22072625.
3. Allouch, M. Conversational agents: goals, technologies, vision and challenges / M. Allouch, A. Azaria, R. Azoulay // Sensors. – 2021. – Vol. 21, No. 24. – P. 1–48. – DOI: 10.3390/s21248448.
4. Hadi, M.U. Large language models: a comprehensive survey of its applications, challenges, limitations, and future prospects / M.U. Hadi [et al.] // Authorea Preprints. – 2024. – Vol. 1, No. 3. – P. 1–47.
5. Garg, P. Large Language Model-Based Autonomous Agents / P. Garg, D. Beeram // International Journal of Computer Trends and Technology. – 2024. – Vol. 72, No. 5. – P. 151–162.
6. Patil, R. A review of current trends, techniques, and challenges in large language models (LLMs) / R. Patil, V. Gudivada // Applied Sciences. – 2024. – Vol. 14, No. 5. – P. 1–42. – DOI: 10.3390/app14052074.
7. Chatbot Market Size, Share & Trends Analysis Report By Offering (Solution, Services), By Type, By Medium, By Business Function, By Application, By Vertical By Region, And Segment Forecasts, 2025 [Электронный ресурс]. – 2030. – URL: https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/chatbot-market (accessed: 19.06.2025).
8. Kim, T. UI/UX for generative AI: taxonomy, trend / T. Kim [et al.] // IEEE Access. – 2024. – Vol. 12. – P. 179891–179911.

9. De Zarzà, I. Emergent cooperation and strategy adaptation in multi-agent systems: an extended coevolutionary theory with LLMs / I. De Zarzà [et al.] // Electronics. – 2023. – Vol. 12, No. 12. – P. 1–8. – DOI: 10.3390/electronics12122722.
10. Nama, P. AI-Powered Mobile Applications: Revolutionizing User Interaction Through Intelligent Features and Context-Aware Services / P. Nama // Journal of Emerging Technologies and Innovative Research. – 2023. – Vol. 10, No. 1. – P. 611–620.

Received: 16.08.2026
Accepted: 19.09.2026
Published: 28.10.2026

УДК 004.9+004.942

DOI: 10.32743/UniTech.2026.151.10.23447

Main threats to frontend applications with LLM integration and risk mitigation methods

Yakovleva Margarita
Senior Angular Frontend Developer, V4Scale
Russia, Saint Petersburg
E-mail: margarita.iiakovleva@gmail.com

Основные угрозы для фронтенд-приложений с LLM-интеграцией и способы снижения рисков

Яковлева Маргарита Александровна
ведущий фронтенд-разработчик (Angular), V4Scale
Российская Федерация, г. Санкт-Петербург

Abstract

The article examines security threats to frontend applications integrated with large language models. The aim of the study is to develop a methodological approach to mitigating the risks of LLM integration in the frontend, taking into account both classical web threats and new LLM-specific threats. The study demonstrates that the integration of an LLM into the user interface transforms the application's risk profile. The specific features of LLM-integrated frontend applications are revealed, a threat classification is developed, and the differences between classical frontend/web vulnerabilities and threats related to prompt injection, prompt leaking, data exfiltration, RAG poisoning, and unsafe tool calls are identified. Particular attention is paid to prompt injection as a threat to LLM integration that can lead to the bypassing of system rules, leakage of user and system data, distortion of model responses, and execution of undesirable actions through connected tools. A typical risk mitigation algorithm is proposed, including procedures for inventorying LLM functions, classifying data, separating instructions from user input, limiting model permissions, validating responses, logging, and red-team testing. The practical significance of the study lies in the applicability of the proposed approach to the design and maintenance of frontend applications with LLM interfaces.

Библиографическое описание: Яковлева М.А. Основные угрозы для фронтенд-приложений с LLM-интеграцией и способы снижения рисков // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23447

For citation: Yakovleva M. Main threats to frontend applications with LLM integration and risk mitigation methods // Universum: Technical Sciences : electronic scientific journal. 2026. No. 10(151). Available at: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23447

Аннотация

В статье рассматриваются угрозы безопасности для фронтенд-приложений с интеграцией больших языковых моделей. Цель исследования состоит в разработке методического подхода к снижению рисков LLM-интеграции во фронтенде с учетом классических веб-угроз и новых угроз, специфичных для LLM. Обосновано, что включение LLM в пользовательский интерфейс трансформирует профиль риска приложения. Раскрыта специфика фронтенд-приложений с LLM-интеграцией, сформирована классификация угроз, выделены различия между классическими уязвимостями фронтенд- и веб-приложений и угрозами, связанными с prompt injection, prompt leaking, data exfiltration, RAG poisoning и unsafe tool calls. Особое внимание уделено prompt injection как угрозе LLM-интеграции, способной приводить к обходу системных правил, утечке пользовательских и служебных данных, искажению ответа модели и выполнению нежелательных действий через подключенные инструменты. Предложен типовой алгоритм снижения рисков, в который входят процедуры инвентаризации LLM-функций, классификации данных, разделения инструкций и пользовательского ввода, ограничения операций модели и подключенных инструментов, проверки ответов модели, логирования и red-team тестирования. Практическая значимость исследования состоит в возможности применения предложенного подхода при проектировании и сопровождении фронтенд-приложений с LLM-интерфейсами.

Keywords: frontend application, LLM, prompt injection, prompt leaking, web security, frontend security, data leakage, RAG poisoning, unsafe tool calls, risk-based approach.

Ключевые слова: фронтенд-приложение, LLM, prompt injection, prompt leaking, web security, frontend security, data leakage, RAG poisoning, unsafe tool calls, risk-based approach.

Introduction

Modern frontend applications are increasingly equipped with LLM-based interfaces, including chatbots, search assistants, content generation tools, document analysis systems, and data assistants. Such applications process not only forms, tokens, cookies, API requests, and browser data, but also prompts, conversation history, system instructions, model outputs, external documents, and the results of tool calls. As a result, the boundary between user data and control instructions becomes less distinct. Indirect prompt injection exploits this convergence of data and instructions, as a malicious instruction may enter the application through a document, web page, or another external source whose content is subsequently passed to the model [1, pp. 81–82].

The relevance of the study stems from the fact that the frontend layer of an application often serves as the user's first point of interaction with an LLM, as it is responsible for collecting user input, displaying model responses, initiating API requests, and transmitting session-related information. A vulnerability at this layer may result in the leakage of user data, disclosure of system instructions, unauthorized tool invocation, or the generation of unsafe responses. Therefore, these risks should be taken into account during the application design process.

The aim of the study is to develop a methodological approach to mitigating the risks associated with LLM integration in frontend applications.

Research methodology

The study is based on a comparative analysis of the scientific literature on the security of LLM-integrated applications, as well as studies on prompt injection, prompt leaking, Prompt-to-SQL injection, structured queries, and the Instruction Hierarchy. In addition, a scenario-based analysis of a typical frontend application with an LLM interface was conducted.

The object of analysis is a web application in which the user interacts with an LLM through a web browser. The analysis covers user request submission, data collection from the user interface (UI), prompt construction, transmission of the request to the backend, communication between the backend service and the LLM, presentation of the model response, as well as the potential execution of actions through APIs, retrieval-augmented generation (RAG), or the tool layer.

The overall risk associated with an LLM-integrated frontend application can be expressed as follows:

$$R_{total} = R_{web} + R_{LLM} + R_{data} + R_{tool},$$

where R_{web} represents classical web security threats; R_{LLM} represents threats associated with prompt injection, jailbreak, prompt leaking, and output manipulation; R_{data} represents the risk of user and system data leakage; R_{tool} represents the risk of undesirable actions performed through APIs, RAG, plugins, and external services.

For practical risk assessment, a five-point scale is used for two parameters: likelihood and impact. The overall risk priority is determined as the product of these parameters:

$$Risk\ Score = L * I,$$

where L denotes the likelihood of the threat occurring, and I represents the severity of its impact.

Results and discussion

An LLM-integrated frontend application differs from a conventional web interface in that part of its behavior is determined by the processing of natural language. The user enters a free-form request, which the model interprets in relation to the system instructions and uses to generate a response. When tools are connected, the model output may be used by the application to call an API, search a knowledge base, generate an SQL query, send a message, or modify data.

The distinctive characteristics of an LLM-integrated frontend application can be described by four key features: open-ended user input, the presence of system instructions, the processing of external data, and the ability to invoke tools (tool calls). Users may provide the model not only with data but also with malicious instructions intended to circumvent established safeguards. The system prompt, developer instructions, and processing rules may contain information about the application's internal logic. In addition, documents, web pages, emails, and RAG data sources may include hidden instructions, while connected tools can transform an incorrect interpretation of such instructions into an operational risk.

Based on the above analysis, the following classification of threats to LLM-integrated frontend applications has been developed:

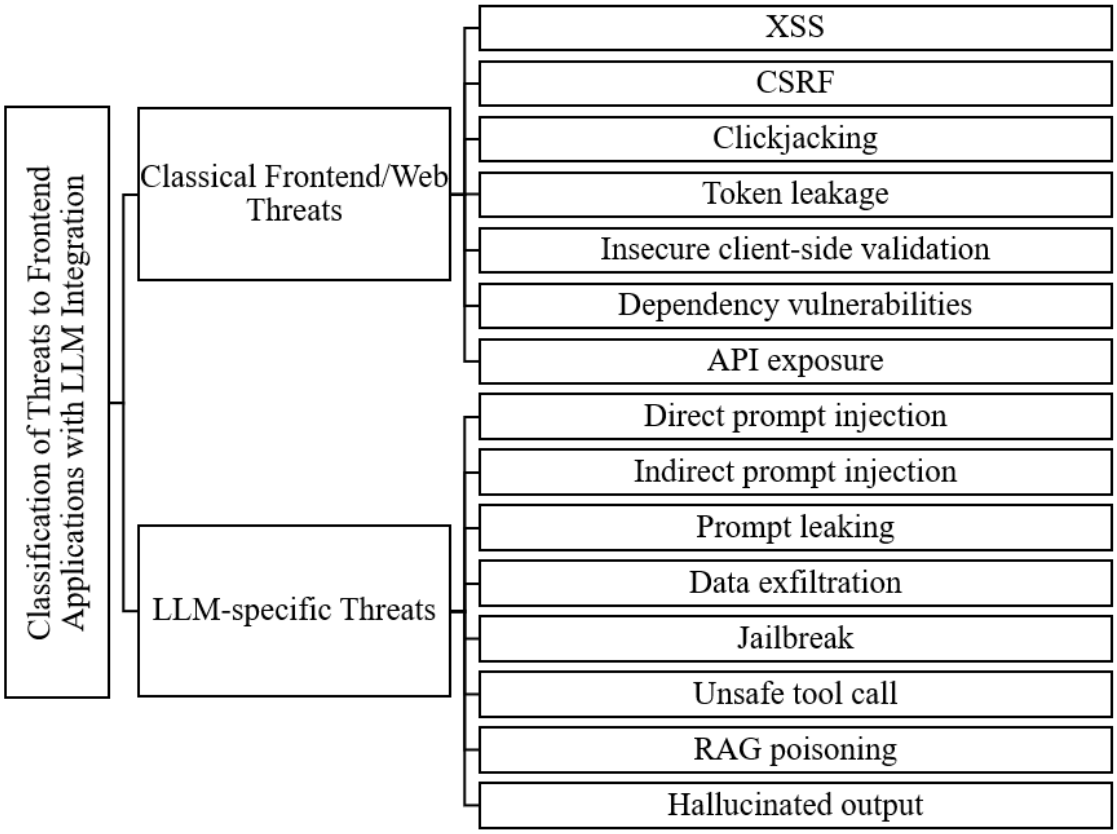


Figure 1. Classification of threats to LLM-integrated frontend applications. Source: compiled by the author

A comparison of the two broad categories of threats reveals the following key differences (Table 1):

Table 1. Comparison of conventional threats to frontend and web applications with threats specific to LLM-integrated applications

Criterion	**Conventional frontend and web application threats**	**LLM-specific threats**
Primary source	Application code, DOM, APIs, dependencies, browser storage	Prompts, external text, RAG sources, model responses
Attack mechanism	Exploitation of technical vulnerabilities	Manipulation of model behavior through textual instructions
Typical example	XSS, CSRF, token leakage	Prompt injection, prompt leaking
Protected assets	Frontend code, user sessions, tokens, API requests	System prompts, user data, application policies, tool calls
Primary security controls	SAST, DAST, Content Security Policy (CSP), dependency scanning	Prompt testing, output validation, red-team testing
Typical impact	Session hijacking, arbitrary code execution, token leakage	Policy bypass, prompt disclosure, unauthorized actions
Security control layer	Frontend, backend, HTTP headers, browser storage	Prompt layer, policy layer, tool layer, logging

One of the key security threats associated with LLM integration is prompt injection. In a direct prompt injection attack, the user explicitly submits an instruction intended to alter the model's behavior. In an indirect prompt injection attack, the malicious instruction is embedded in external content, such as a document, web page, email, knowledge base, or text retrieved from a third-party

source. According to the study in [2, p. 1], prompt injection can lead to prompt theft, unauthorized use of LLM capabilities, and the circumvention of application safeguards. The proposed HouYi attack method was evaluated on 36 real-world LLM-integrated applications, of which 31 were found to be vulnerable [2]. Figure 2 illustrates the attack chain through an LLM interface.

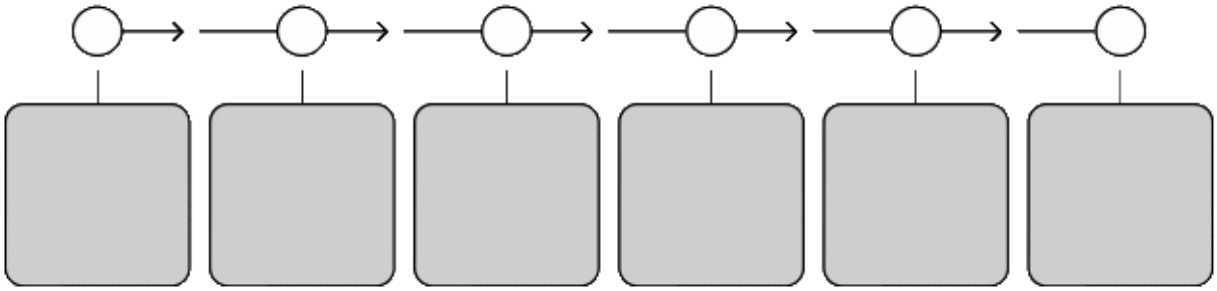


Figure 2. Prompt injection attack chain through an LLM interface. Source: compiled by the author

Thus, the attack chain begins with untrusted input, such as a user message, external document, web page content, a fragment retrieved from a RAG source, or the output of another tool. A prompt is then constructed at the frontend or backend layer, where user-provided data may be combined with system instructions. If the model does not reliably distinguish between trusted instructions and the data being processed, it may incorrectly interpret a malicious command embedded in the data as an instruction to execute. When the attack succeeds, the command affects either the generated response or the selection of a subsequent action. This may result in the disclosure of system instructions, exposure of another user's data, generation of malicious code, manipulation of recommendations, or an unauthorized call to an external tool.

LLM resilience to prompt injection is commonly evaluated using benchmark-based approaches. Such attacks can be tested against large collections of adversarial and defensive prompts, making a single manual assessment insufficient to establish the security of an LLM interface [3, pp. 1–3]. Another important threat is prompt leaking, an attack aimed at extracting the system prompt, which may contain processing rules, internal constraints, response templates, and information about the application's security policies [4, p. 3600]. Web applications are also vulnerable to Prompt-to-SQL injection, in which a user prompt influences the generation of SQL queries. Accordingly, effective protection should include the principle of least privilege, validation of generated SQL queries, and verification of database operations before execution [5, p. 1778]. Based on the above analysis, a general algorithm for mitigating the risks associated with LLM integration can be proposed (Figure 3)

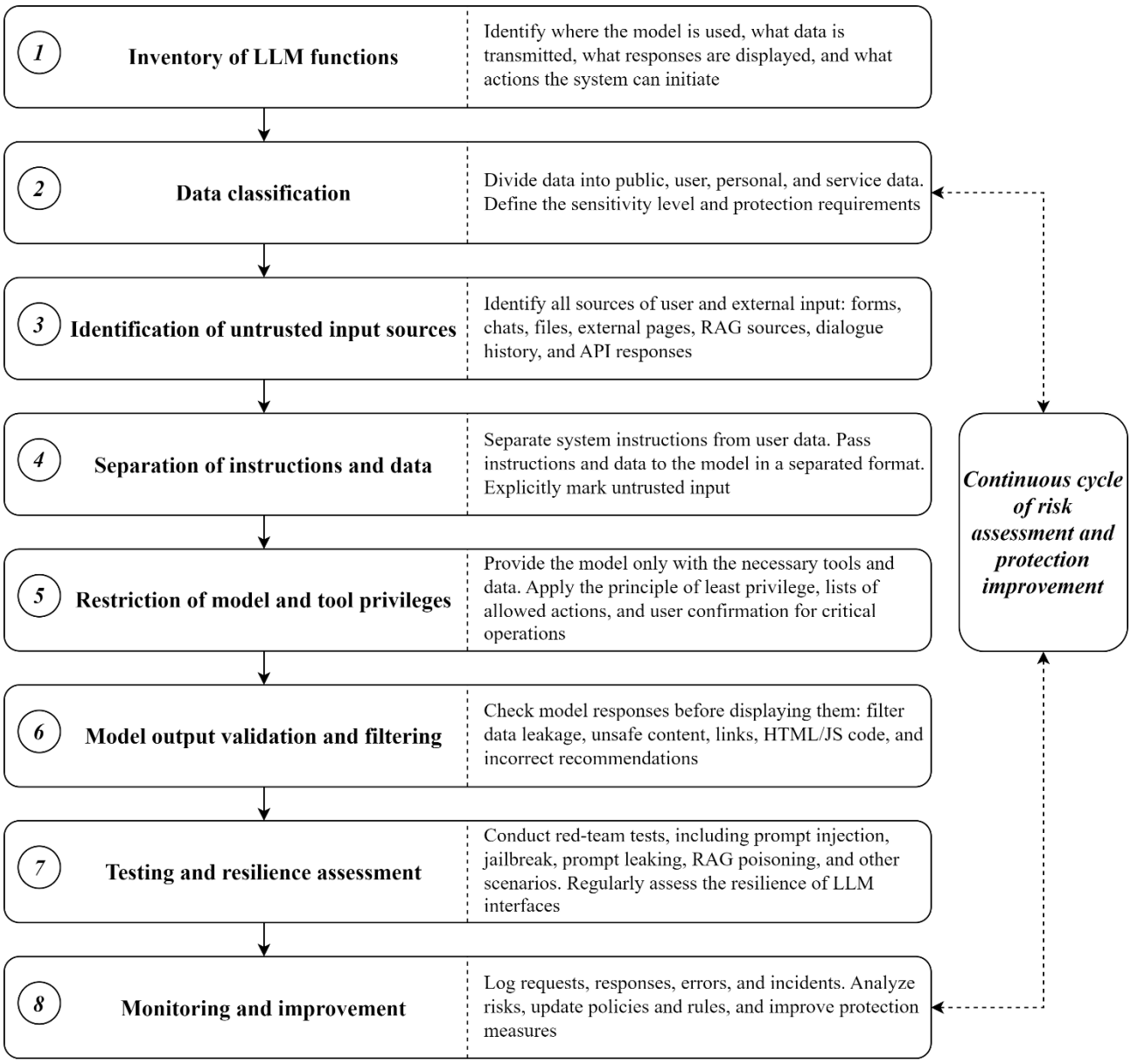


Figure 3. General algorithm for mitigating the risks of LLM integration in frontend applications. Source: compiled by the author

The standard algorithm for mitigating the risks of LLM integration is structured as a sequential procedure for controlling data, prompts, the model, tools, and the user interface. It begins with an inventory of LLM-enabled functions, data classification, and the identification of untrusted input sources. The next step involves separating system instructions from user-provided data in accordance with the StruQ approach [6, p. 2383]. Subsequent stages include restricting the model's permissions, validating outputs, controlling tool calls, conducting red-team testing, and monitoring security incidents. Critical actions initiated through an LLM must undergo server-side validation, be restricted by an allowlist and the principle of least privilege, and require user confirmation. Such actions should be executed by the application or the tool layer rather than by the model itself. Before being displayed, model responses must undergo output validation and checks for personal data leakage, while HTML and Markdown content must be sanitized. In addition, instruction priority should be explicitly defined so that system instructions and developer instructions take

precedence over user input and third-party data. This principle is consistent with the Instruction Hierarchy approach and reduces the risk of internal rules being overridden by untrusted content [7, p. 2].

Practical implementation of the proposed algorithm requires that secrets never be included in prompts, user input be explicitly identified as untrusted, and API and tool calls be executed through a backend service with appropriate authorization checks [8, p. 10471]. Security measures specific to the LLM layer complement, rather than replace, conventional frontend and web application security practices. Accordingly, Content Security Policy, secure token storage, dependency management, protection against XSS attacks, and validation of generated HTML and Markdown content remain essential. The decision to enable an LLM-powered function should be based on an assessment of the residual risk, particularly when the function involves personal data, financial transactions, internal documents, or legally significant operations.

To summarize the proposed approach, Figure 4 presents a conceptual assessment of risk levels before and after the implementation of protective measures. It highlights differences between threat categories, the relationship between likelihood and impact, the effectiveness of security controls, and the distribution of risks across the different layers of the application

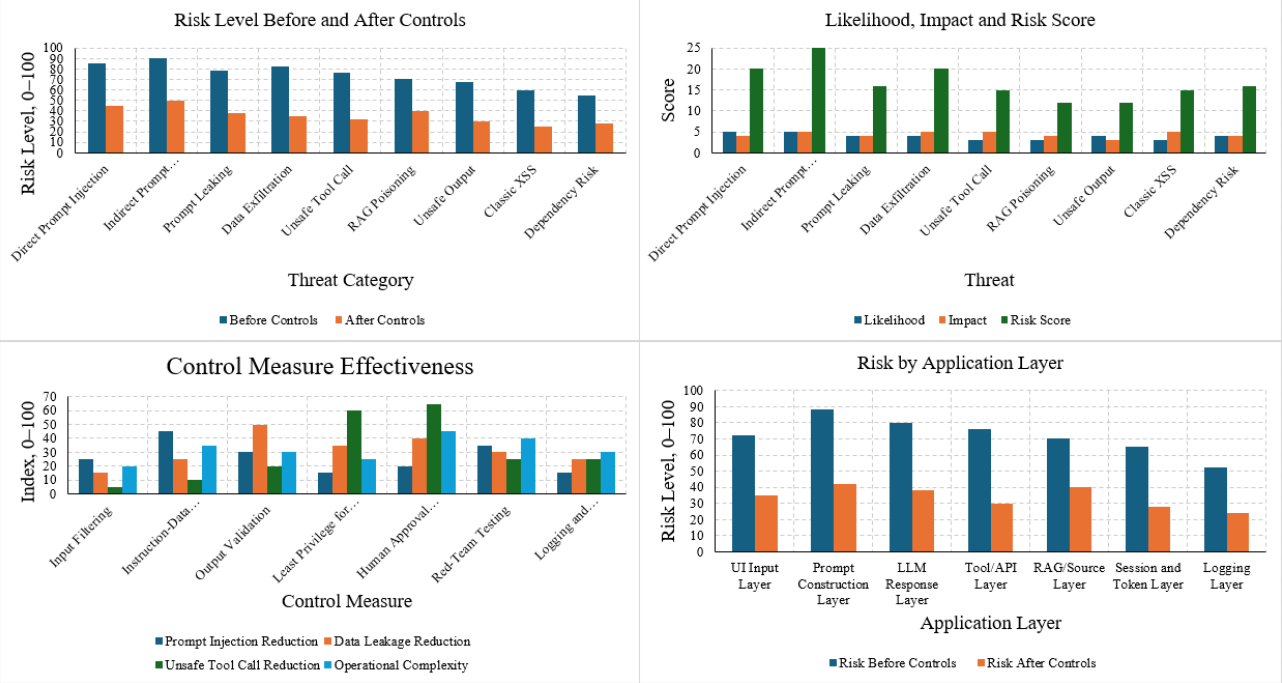


Figure 4. Comparison of risk levels for an LLM-integrated frontend application before and after the implementation of security measures. Source: compiled by the author

The results indicate that the highest baseline risk is associated with indirect prompt injection, direct prompt injection, data exfiltration, and prompt leaking. Within the proposed model, the level of risk decreases across all threat categories following the implementation of security measures; however, residual risk remains for indirect prompt injection and RAG poisoning [9, p. 3827]. Jailbreak attacks constitute another relevant threat, as specially constructed user instructions may be used to circumvent the behavioral restrictions imposed on the model [10, p. 1486]. Particular attention should be paid to the prompt construction layer, as it is the point at which user input, system instructions, and application data are combined.

Conclusion

Frontend applications with LLM integration require a dedicated risk-oriented approach to security. While conventional web security threats remain relevant, they are supplemented by risks specific to LLM-based systems, including prompt injection, prompt leaking, data exfiltration, unsafe tool calls, and RAG poisoning. Prompt injection should be regarded as one of the most critical threats because it exploits the model's ability to follow natural language instructions and may enable the circumvention of application security policies. The scientific contribution of this study lies in distinguishing between these two categories of threats and in developing an algorithm for mitigating the risks associated with LLM integration. The practical value of the proposed approach lies in its application to the design, development, and maintenance of LLM-based interfaces.

References

1. Greshake K., Abdelnabi S., Mishra S., Endres C., Holz T., Fritz M. Not What You've Signed Up For: Compromising Real-World LLM-Integrated Applications with Indirect Prompt Injection // Proceedings of the 16th ACM Workshop on Artificial Intelligence and Security. ACM. – 2023. – P. 79–90. – DOI: 10.1145/3605764.3623985.
2. Liu Y., Deng G., Li Y., Wang K., Zhang T., Liu Y., Wang H., Zheng Y., Liu Y. Prompt Injection attack against LLM-integrated Applications // arXiv preprint arXiv:2306.05499v1. – 2023. – P. 1–18. – DOI: 10.48550/arXiv.2306.05499. – URL: https://arxiv.org/abs/2306.05499v1 (accessed: 19.08.2026).
3. Toyer S., Watkins O., Mendes E.A., Svegliato J., Bailey L., Wang T., Ong I., Elmaaroufi K., Abbeel P., Darrell T., Ritter A., Russell S. Tensor Trust: Interpretable Prompt Injection Attacks from an Online Game // Proceedings of the International Conference on Learning Representations. – 2024. – P. 1–33.
4. Hui B., Yuan H., Gong N., Burlina P., Cao Y. PLeak: Prompt Leaking Attacks against Large Language Model Applications // CCS '24: Proceedings of the. – New York: Association for Computing Machinery, 2024. – P. 3600–3614. – DOI: 10.1145/3658644.3670370. – URL: https://dl.acm.org/doi/10.1145/3658644.3670370 (accessed: 19.08.2026).
5. Pedro R., Castro D., Carreira P., Santos N. Prompt-to-SQL Injections in LLM-Integrated Web Applications: Risks and Defenses // Proceedings of the 47th IEEE/ACM International Conference on Software Engineering. IEEE. – 2025. – P. 1768–1780. – DOI: 10.1109/ICSE55347.2025.00007.
6. Chen S., Piet J., Sitawarin C., Wagner D. StruQ: Defending Against Prompt Injection with Structured Queries // Proceedings of the 34th USENIX Security Symposium. USENIX Association. – 2025. – P. 2383–2400.
7. Wallace E., Xiao K., Leike R., Weng L., Heidecke J., Beutel A. The Instruction Hierarchy: Training LLMs to Prioritize Privileged Instructions // arXiv preprint arXiv:2404.13208. – 2024. – P. 1–13. – DOI: 10.48550/arXiv.2404.13208. – URL: https://arxiv.org/abs/2404.13208 (accessed: 19.08.2026).

8. Zhan Q., Liang Z., Ying Z., Kang D. InjecAgent: Benchmarking Indirect Prompt Injections in Tool-Integrated Large Language Model Agents // Findings of the Association for Computational Linguistics: ACL. – 2024. – P. 10471–10506. – DOI: 10.18653/v1/2024.findings-acl.624. – URL: https://aclanthology.org/2024.findings-acl.624/ (accessed: 12.09.2026).
9. Zou W., Geng R., Wang B., Jia J. PoisonedRAG: Knowledge Corruption Attacks to Retrieval-Augmented Generation of Large Language Models // Proceedings of the 34th USENIX Security Symposium. – 2025. – P. 3827–3844. – URL: https://www.usenix.org/conference/usenixsecurity25/presentation/zou-poisonedrag (accessed: 12.09.2026).
10. Xie Y., Yi J., Shao J., Curl J., Lyu L., Chen Q., Xie X., Wu F. Defending ChatGPT against Jailbreak Attack via Self-Reminders // Nature Machine Intelligence. – 2023. – Vol. 5, No. 12. – P. 1486–1496. – DOI: 10.1038/s42256-023-00765-8. – URL: https://www.nature.com/articles/s42256-023-00765-8 (accessed: 12.09.2026).

INDUSTRY AND MANUFACTURING

CHEMICAL TECHNOLOGIES AND CHEMICAL INDUSTRY

Received: 30.09.2026
Accepted: 05.10.2026
Published: 28.10.2026

УДК 667.6+620.197

Adhesion strength of coatings based on hydrolyzed polyacrylonitrile modified with glycerin, dimethylol urea and dibutyl phthalate on a steel substrate

Ismatov Sherzod
Assistant
Karshi State Technical University
Republic of Uzbekistan, Karshi
ORCID: 0000-0002-5062-2903
E-mail: sherzodismatov412@gmail.com

Адгезионная прочность покрытий на основе гидролизованного полиакрилонитрила, модифицированного глицерином, диметилолмочевиной и дибутилфталатом, на стальной подложке

Исматов Шерзод
ассистент
Каршинский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Карши

Abstract

The aim of the work was to establish the effect of the synthesis temperature and the content of polyfunctional modifiers on the adhesion strength of protective coatings based on hydrolyzed polyacrylonitrile (HPAN). Compositions containing 50 mL of HPAN, 2–14 mL of glycerin and 1–7 wt.% each of dimethylol urea and dibutyl phthalate were synthesized at 30, 40 and 50 °C, applied by dipping onto St3 carbon steel plates and cured for 48 h at 25 °C. Adhesion was determined by the pull-off method according to GOST 32299-2013 (ISO 4624:2002) and ASTM D4541. At all synthesis temperatures the adhesion strength increases with the modifier content and reaches 588 N/cm^2 (5.88 MPa). Raising the synthesis temperature from 30 to 50 °C increases the adhesion of

Библиографическое описание: Исматов Ш. Адгезионная прочность покрытий на основе гидролизованного полиакрилонитрила, модифицированного глицерином, диметилолмочевиной и дибутилфталатом, на стальной подложке // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23503

For citation: Ismatov S. Adhesion strength of coatings based on hydrolyzed polyacrylonitrile modified with glycerin, dimethylol urea and dibutyl phthalate on a steel substrate // Universum: Technical Sciences : electronic scientific journal. 2026. No. 10(151). Available at: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23503

coatings of equal composition only slightly (by 0.7–2.0 %), but narrows the range of compositions that form coatings suitable for testing: at 30 °C such coatings are obtained with up to 10 mL of glycerin, at 40 and 50 °C – only up to 8 mL. Synthesis at 30 °C with an HPAN: glycerin volume ratio of 5: 1 (5 wt.% of dimethylol urea and dibutyl phthalate) is therefore recommended as optimal: it provides the maximum adhesion at the lowest synthesis temperature. The concentration dependences of adhesion are adequately described by polynomial approximations. The results can be used in the development of anti-corrosion coatings for steel structures.

Аннотация

Цель работы – установить влияние температуры синтеза и содержания полифункциональных модификаторов на адгезионную прочность защитных покрытий на основе гидролизованного полиакрилонитрила (ГИПАН). Композиции, содержащие 50 мл ГИПАН, 2–14 мл глицерина и по 1–7 мас.% диметилолмочевины и дибутилфталата, синтезировали при 30, 40 и 50 °C, наносили методом окунания на пластины из углеродистой стали Ст3 и отверждали 48 ч при 25 °C. Адгезию определяли методом отрыва по ГОСТ 32299-2013 (ISO 4624:2002) и ASTM D4541. При всех температурах синтеза адгезионная прочность возрастает с увеличением содержания модификаторов и достигает 588 Н/см^2 (5,88 МПа). Повышение температуры синтеза с 30 до 50 °C незначительно увеличивает адгезию покрытий одинакового состава (на 0,7–2,0 %), но сужает область составов, образующих покрытия, пригодные для испытаний: при 30 °C такие покрытия получены при содержании глицерина до 10 мл, при 40 и 50 °C – лишь до 8 мл. Оптимальным признан синтез при 30 °C при объёмном соотношении ГИПАН: глицерин = 5: 1 (по 5 мас.% диметилолмочевины и дибутилфталата), обеспечивающий максимальную адгезию при наименьшей температуре синтеза. Концентрационные зависимости адгезии адекватно описываются полиномиальными аппроксимациями. Результаты могут быть использованы при разработке противокоррозионных покрытий для стальных конструкций.

Keywords: hydrolyzed polyacrylonitrile, adhesion strength, pull-off test, protective coatings, dimethylol urea, synthesis temperature, steel substrate.

Ключевые слова: гидролизованный полиакрилонитрил, адгезионная прочность, метод отрыва, защитные покрытия, диметилолмочевина, температура синтеза, стальная подложка.

Introduction

Corrosion of metal structures causes considerable economic and environmental damage, and polymer coatings remain one of the most widely used means of protection [1-3]. The service life of such coatings is determined primarily by their adhesion strength to the metal substrate, which depends on the chemical nature of the film former, the presence of polar functional groups capable of interacting with the oxidized metal surface, and the level of internal stresses arising during film formation [4-7].

Earlier, our research group developed hydrophobizing, heat-insulating and organosilicon polymer compositions [8-11], as well as multifunctional organomineral coatings and corrosion inhibitors [12]. Hydrolyzed polyacrylonitrile (HPAN), widely used as a reagent in oil production

and in gel-forming compositions [13-15], is of particular interest as a film former: alkaline hydrolysis of polyacrylonitrile converts nitrile groups into carboxylate and amide groups [16], which are able both to interact with the metal surface and to take part in cross-linking reactions. In our previous works, film-forming corrosion inhibitors based on HPAN were obtained and the physical and mechanical properties of their films were studied [17-19].

The adhesion of HPAN-based coatings, however, depends strongly on the structure of the polymer matrix formed at the synthesis stage. It can be assumed that the synthesis temperature governs the rate of cross-linking reactions between HPAN, glycerin and dimethylol urea and hence the density of the three-dimensional network, while dibutyl phthalate, acting as a plasticizer, reduces internal stresses in the film. The relationship between the synthesis temperature, the modifier content and the adhesion strength of such coatings has not been studied systematically [20-22].

The aim of this work was to determine the effect of the synthesis temperature (30–50 °C) and of the content of glycerin, dimethylol urea and dibutyl phthalate on the adhesion strength of HPAN-based coatings on carbon steel.

Materials and methods

Hydrolyzed polyacrylonitrile (HPAN) was used as the film-forming base; glycerin, dimethylol urea (DMU) and dibutyl phthalate (DBP) were used as modifiers. The compositions were prepared from 50 mL of HPAN, 2–14 mL of glycerin and DMU and DBP in amounts of 1–7 wt.% each relative to the total mass of the composition (Tables 1–3). Synthesis was carried out at 30, 40 and 50 °C; the temperature was kept constant in order to control the rate of the cross-linking reactions.

Plates of St3 carbon steel served as substrates; before coating they were mechanically cleaned and degreased. The compositions were applied by dipping. To exclude the influence of curing conditions, all coated samples were cured under identical conditions (25 °C, 48 h), so that the differences in adhesion reflect the structure formed during synthesis.

Adhesion strength was determined by the pull-off method in accordance with GOST 32299-2013 (ISO 4624:2002) [13] and ASTM D4541 [1]: aluminum dollies were bonded to the coating, and the maximum tensile force required for detachment was recorded. The results are expressed in N/cm^2 (1 N/cm^2 = 0.01 MPa). Compositions that did not form a coating suitable for testing are marked «not measurable» in the tables. The experimental dependences were approximated by polynomial regression, and the quality of approximation was assessed by the coefficient of determination R^2.

Results and discussion

The adhesion strength of the compositions synthesized at 30 °C is presented in Table 1 and Fig. 1.

Table 1. Adhesion strength of HPAN-based compositions synthesized at 30 °C as a function of modifier content

№	HPAN, mL	Modifier content			Adhesion strength, N/cm^2
		glycerin, mL	DMU, wt.%	DBP, wt.%	
1	50	2	1	1	560
2	50	4	2	2	576
3	50	6	3	3	579
4	50	8	4	4	581
5	50	10	5	5	588
6	50	12	6	6	not measurable
7	50	14	7	7	not measurable

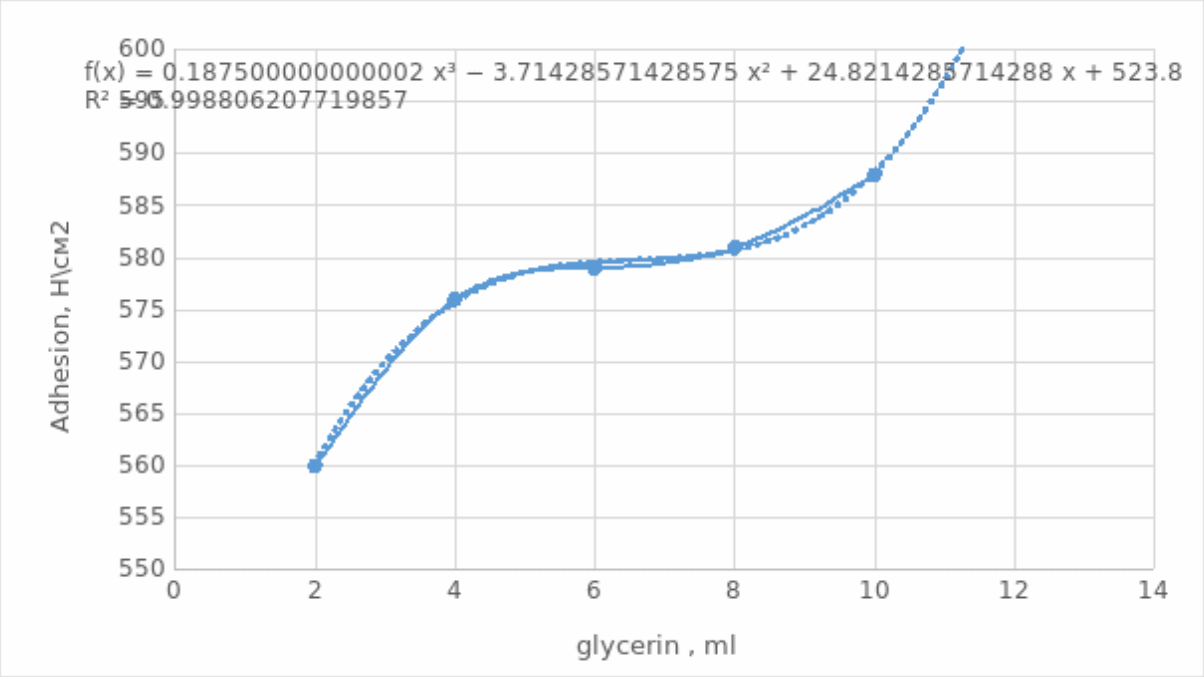


Figure 1. Dependence of the adhesion strength of HPAN-based compositions synthesized at 30 °C on the glycerin content (DMU and DBP content changes proportionally, see Table 1)

As follows from Table 1, an increase in the glycerin content from 2 to 10 mL (with a simultaneous increase in the DMU and DBP content from 1 to 5 wt.%) raises the adhesion strength from 560 to 588 N/cm^2 (5.60–5.88 MPa), i.e. by 5.0 %. The largest gain (16 N/cm^2) is observed between the first and second compositions, after which the growth slows down. Compositions containing 12 and 14 mL of glycerin did not form coatings suitable for measurement.

The results obtained for the compositions synthesized at 40 °C are presented in Table 2 and Fig. 2.

Table 2. Adhesion strength of HPAN-based compositions synthesized at 40 °C as a function of modifier content

№	HPAN, mL	Modifier content			Adhesion strength, N/cm^2
		glycerin, mL	DMU, wt.%	DBP, wt.%	
1	50	2	1	1	568
2	50	4	2	2	579
3	50	6	3	3	581
4	50	8	4	4	583
5	50	10	5	5	not measurable
6	50	12	6	6	not measurable
7	50	14	7	7	not measurable

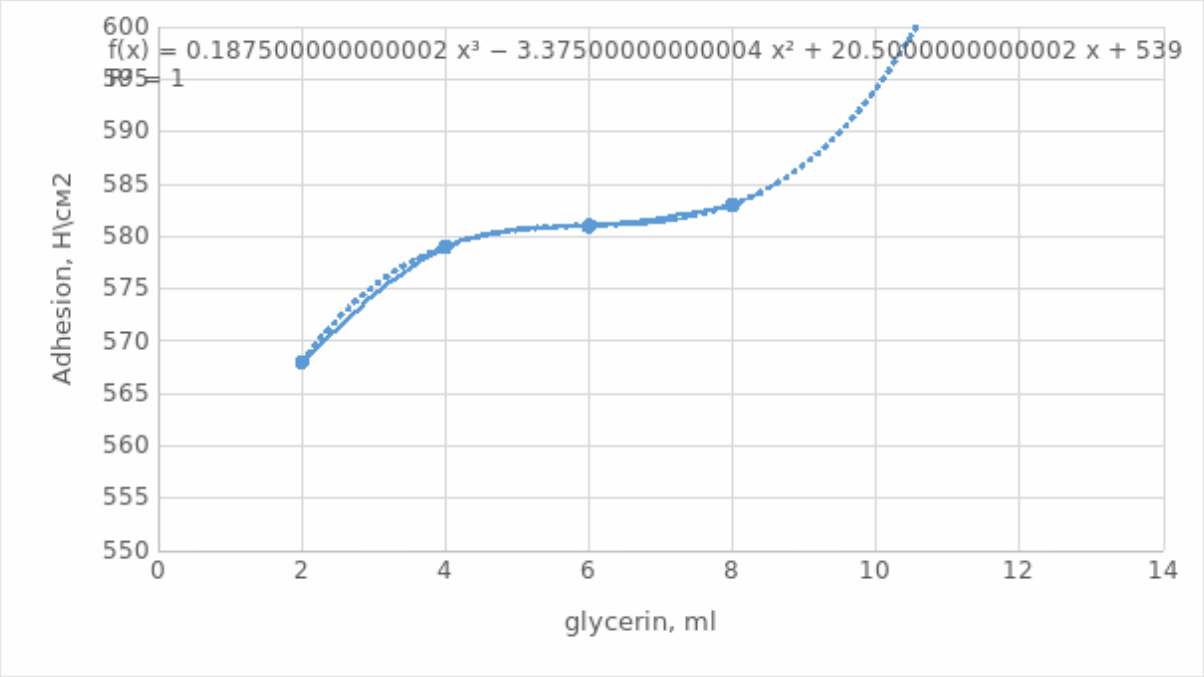


Figure 2. Dependence of the adhesion strength of HPAN-based compositions synthesized at 40 °C on the glycerin content (DMU and DBP content changes proportionally, see Table 2)

At 40 °C the adhesion increases from 568 to 583 N/cm^2 (by 2.6 %) as the glycerin content rises from 2 to 8 mL; for compositions containing 10 mL of glycerin or more the adhesion could not be measured.

The results for the compositions synthesized at 50 °C are presented in Table 3 and Fig. 3.

Table 3. Adhesion strength of HPAN-based compositions synthesized at 50 °C as a function of modifier content

№	HPAN, mL	Modifier content			Adhesion strength, N/cm^2
		glycerin, mL	DMU, wt.%	DBP, wt.%	
1	50	2	1	1	571
2	50	4	2	2	580
3	50	6	3	3	583
4	50	8	4	4	588

№	HPAN, mL	Modifier content			Adhesion strength, N/cm^2
		glycerin, mL	DMU, wt.%	DBP, wt.%	
5	50	10	5	5	not measurable
6	50	12	6	6	not measurable
7	50	14	7	7	not measurable

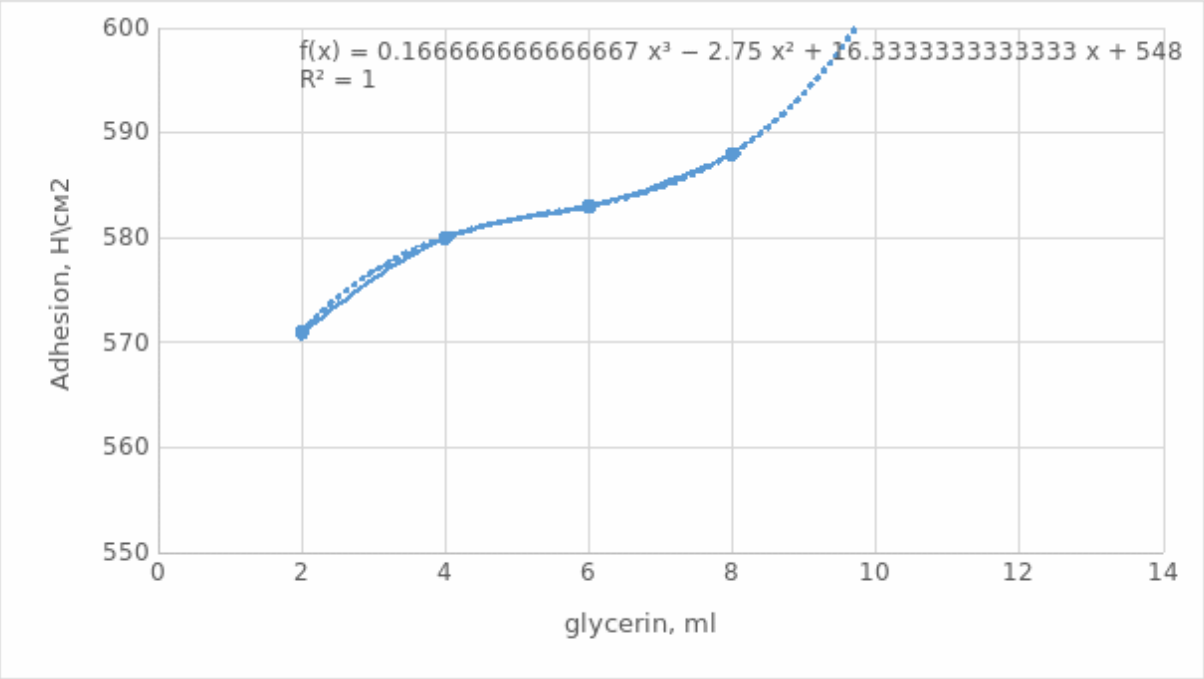


Figure 3. Dependence of the adhesion strength of HPAN-based compositions synthesized at 50 °C on the glycerin content (DMU and DBP content changes proportionally, see Table 3)

At 50 °C the adhesion grows from 571 to 588 N/cm^2 (by 3.0 %) in the range of 2–8 mL of glycerin; compositions with 10 mL of glycerin or more were not measurable.

Comparison of Tables 1–3 reveals two opposite effects of the synthesis temperature. At equal composition, increasing the temperature from 30 to 50 °C slightly increases adhesion (by 0.7–2.0 %; e.g., from 560 to 571 N/cm^2 for the composition with 2 mL of glycerin). At the same time, the range of compositions that form measurable coatings becomes narrower: at 30 °C coatings are obtained with up to 10 mL of glycerin, whereas at 40 and 50 °C – only up to 8 mL. The maximum adhesion (588 N/cm^2) is achieved both at 30 °C with 10 mL of glycerin and at 50 °C with 8 mL of glycerin.

These regularities can be explained by cross-linking of the HPAN macromolecules. DMU, as a polyfunctional cross-linking agent, reacts with the carboxyl and amide groups of HPAN and with the hydroxyl groups of glycerin to form a three-dimensional network; a moderate increase in the network density raises the cohesive strength of the film and, consequently, the measured pull-off strength [3; 18]. DBP plasticizes the network and reduces internal stresses at the polymer–metal interface. A higher synthesis temperature accelerates cross-linking, so that at a high modifier content the composition presumably reaches the gel state before application, which prevents the

formation of a continuous coating. This is consistent with the results of our earlier studies of HPAN-based films [4; 7]. Confirmation of this mechanism requires additional structural studies (IR spectroscopy, determination of the gel fraction).

The concentration dependences of adhesion are approximated by polynomials (Fig. 1–3). For 30 °C (five experimental points) the third-order polynomial gives $R^2 = 0.999$. For 40 and 50 °C only four experimental points are available, so a third-order polynomial passes through all of them exactly; a second-order polynomial gives $R^2 = 0.970$ and 0.979, respectively, which confirms the regular character of the dependences.

Taking into account both the adhesion value and the width of the working range of compositions, synthesis at 30 °C with an HPAN: glycerin volume ratio of 5: 1 is optimal: it provides the maximum adhesion (588 N/cm^2) at the lowest synthesis temperature.

Conclusion

1. The adhesion strength of coatings based on HPAN modified with glycerin, dimethylol urea and dibutyl phthalate on St3 steel was determined by the pull-off method according to GOST 32299-2013 (ISO 4624:2002). At all synthesis temperatures (30–50 °C) the adhesion increases with the modifier content and reaches 588 N/cm^2 (5.88 MPa).

2. Raising the synthesis temperature from 30 to 50 °C increases the adhesion of coatings of equal composition by 0.7–2.0 %, but narrows the range of compositions forming measurable coatings from 10 to 8 mL of glycerin per 50 mL of HPAN.

3. The optimal conditions are synthesis at 30 °C and the composition 50 mL of HPAN, 10 mL of glycerin, 5 wt.% of DMU and 5 wt.% of DBP (HPAN: glycerin = 5: 1), which provide an adhesion strength of 588 N/cm^2.

4. The compositions obtained are promising as film-forming anti-corrosion coatings for steel; further work should be aimed at studying their corrosion resistance and network structure.

References

1. ASTM D4541-17. Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers. – West Conshohocken, PA: ASTM International. – West Conshohocken, PA: ASTM International. – 2017.
2. Ataqulova D., Ismatov Sh.A. [et al.] A new highly effective inhibitor based on 2,7-dimethyl-2,7-dicyano-3,6-diazaoctane // Journal of Pharmaceutical Negative Results. – 2023. – P. 883–889.
3. Awaja F., Gilbert M., Kelly G., Fox B., Pigram P.J. Adhesion of polymers // Progress in Polymer Science. – 2009. – Vol. 34, No. 9. – P. 948–968. – DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2009.04.007.
4. Axmedov V.N., Beshimov I.A., Ismatov Sh.A. Analysis of physical and mechanical properties of the synthesized film // Development of Science. – 2026. – No. 1. – P. 9–14.
5. Axmedov V.N., Beshimov I.A., Ismatov Sh.A. Production and properties of film-forming corrosion inhibitors // Development of Science. – 2026. – No. 1. – P. 15–19.
6. Axmedov V.N., Ismatov Sh.A. Technological aspects of production of homogeneous film-forming corrosion inhibitors // Bulletin of Karshi State University. – 2024. – No. 4. – P. 21–24.

7. Axmedov V.N., Jumaev J.X., Ismatov Sh.A. Synthesis and investigation of properties of film-forming polymers // Development of Science. – 2025. – No. 8. – P. 131–136.
8. Axmedov V.N. [et al.] Ecological problems of industrially developed regions // Proceedings of the Scientific and Practical Conference (December 20–21. – 2018.
9. Axmedov V.N. [et al.] Hydrophobization in construction: monograph. – Bukhara: Durdona, 2018.
10. Axmedov V.N. [et al.] Production and application of hydrophobizing polymer compositions // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology (IJARSET). – 2018. – Vol. 5, No. 11. – P. 7340–7345.
11. Axmedov V.N. [et al.] Some aspects of obtaining hydrophobic cement // Development of Science and Technologies. – 2018. – No. 1. – P. 69–73.
12. Axmedov V.N. [et al.] Technology for obtaining organosilicon polymers // Proceedings of the Conference of Young Researchers. – 2018. – P. 472–474.
13. GOST 32299-2013 (ISO 4624:2002). Paint materials. Determination of adhesion by pull-off method. (In Russ.).
14. Ismatov Sh.A. Gel-forming compositions based on inorganic reagents // Modern Science and Research. – 2024. – Vol. 3, No. 11. – P. 257–260.
15. Ismatov Sh.A. Production of film-forming corrosion inhibitors // International Scientific Online Conferences. – 2024. – P. 260–262.
16. Jumaboyev B.O., Ismatov Sh.A. Properties and technology of multifunctional organomineral coatings // Journal of Multidisciplinary Bulletin. – 2023. – Vol. 6, No. 4. – P. 86–92.
17. Kibriyo B.O., Ismatov Sh.A. Study of secondary methods of oil production // Innovations in Technology and Science Education. – 2023. – Vol. 2, No. 8. – P. 397–400.
18. Kinloch A.J. Adhesion and Adhesives: Science and Technology. – London: Chapman and Hall, 1987. – 441 P.
19. Niyazov L.N. [et al.] Hydrophobization of cement and ceramic products // Composite Materials. – 2019. – No. 1. – P. 106–109.
20. Panoev N.Sh., Axmedov V.N. Creation of a new composition of heat-insulating coatings // Development of Science and Technologies. – 2019. – No. 3. – P. 64–69.
21. Pérez-Álvarez L., Ruiz-Rubio L., Moreno I., Vilas-Vilela J.L. Pérez-Álvarez L., Ruiz-Rubio L., Moreno I., Vilas-Vilela J.L. Characterization and optimization of the alkaline hydrolysis of polyacrylonitrile membranes // Polymers. – 2019. – Vol. 11, No. 11. – Art. 1843. – DOI: 10.3390/polym11111843.
22. Sobirov B. [et al.] Influence of parameters on the yield of organosilicon monomers // Youth – the Key to the Future: Proceedings of the Conference. – 2019. – P. 294–296.

Received: 12.09.2026
Accepted: 18.09.2026
Published: 28.10.2026

УДК 633.522+579.64+677.021.16

DOI: 10.32743/UniTech.2026.151.10.23450

Chemical and Microbiological Aspects of Water Retting for Fiber Extraction from Industrial *Cannabis* Stems

Nabieva Iroda Abdusamatovna
DSc, Professor
Department of Chemical and Printing Engineering, Tashkent Institute of Textile and Light Industry
Uzbekistan, Tashkent
E-mail: niroda@bk.ru
Yasinskaya Natalya Nikolaevna
DSc, Professor
Head of the Department of Ecology and Chemical Technologies, Vitebsk State Technological University
Belarus, Vitebsk
E-mail: yasinskaya.natallia@gmail.com
Mamatvaliyev Ibrohimjon Tolib ugli
Assistant
Department of Chemistry, Namangan State Technical University
Uzbekistan, Namangan
Abdumajidov Anvar Abdumalikovich
PhD, Associate Professor
Department of Chemical and Printing Engineering, Tashkent Institute of Textile and Light Industry
Uzbekistan, Tashkent
E-mail: anvarshoh@mail.ru
Miratayev Abdumalik Abdumadjidovich
PhD, Associate Professor
Department of Chemical and Printing Engineering, Tashkent Institute of Textile and Light Industry
Uzbekistan, Tashkent
E-mail: amiratayev1956@mail.ru

Химические и микробиологические аспекты мочки в воде для извлечения волокна из стеблей промышленной конопли

Набиева Ирода Абдусаматовна
д-р техн. наук, проф.
кафедры химической и полиграфической инженерии, Ташкентский институт текстильной и лёгкой промышленности
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Библиографическое описание: Химические и микробиологические аспекты мочки в воде для извлечения волокна из стеблей промышленной конопли // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Набиева И.А. [и др.]. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23450

For citation: Chemical and Microbiological Aspects of Water Retting for Fiber Extraction from Industrial Cannabis Stems // Universum: Technical Sciences : electronic scientific journal. Nabieva I.A. et al. 2026. No. 10(151). Available at: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23450

Ясинская Наталья Николаевна
д-р техн. наук, проф.
заведующая кафедрой экологии и химических технологий, Витебский государственный технологический университет
Республика Беларусь, г. Витебск
Маматвалиев Иброхимжон Толиб угли
ассистент кафедры химии
Наманганский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Наманган
Абдумажидов Анвар Абдумаликович
д-р филос. (PhD) по техническим наукам, доц.
кафедры химической и полиграфической инженерии, Ташкентский институт текстильной и лёгкой промышленности
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Миратаев Абдумалик Абдумаджидович
д-р филос.(PhD) по техническим наукам, доц.
кафедры химической и полиграфической инженерии
Ташкентский институт текстильной и лёгкой промышленности
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Abstract

The objective of this study was to establish a suitable duration of water retting for fiber extraction from industrial Cannabis stems, taking into account pectin removal and changes in cellulose content. Stems were immersed in water and examined after 3, 5, and 7 days. Pectin determination involved extraction with ammonium oxalate and oxalic acid, ethanol precipitation, and gravimetric measurement. Cellulose content was assessed separately. Chemical analyses were complemented by measurements of dissolved oxygen and pH and microbiological examination of the retting water. Between days 3 and 5, pectin content decreased from 8.5 % to 3.1 %, equivalent to a relative reduction of 63.5 %; the corresponding decrease in cellulose content was 8.2 %, from 49 % to 45 %. Further retting produced a different pattern. By day 7, pectin content had declined only to 2.7 %, whereas the cellulose fraction had fallen to 37 %. *Bacillus*, *Pseudomonas*, and *Paenibacillus* were detected on days 3 and 5. The detection of Cellulomonas and Aspergillus on day 7 coincided with the greater decline in cellulose content. Dissolved oxygen decreased from 8.2 to 1.5 mg/L over the observation period, accompanied by a pH decrease from 7.5 to 4.5. Five days was selected as the appropriate duration under the experimental conditions: fiber bundles could be separated mechanically from the woody core, while extending treatment yielded limited additional pectin removal and a larger decrease in cellulose content.

Аннотация

В работе изучались, изменение химического состава стеблей технической конопли и микробиологическая среда при водной мацерации. Задачей процесса являлось установление рациональной продолжительности обработки, при которой волокно отделяется без лишних потерь. Контролирование процессом проводилось систематическим измерением количества пектина, целлюлозы, растворенного кислорода, pH, а также слежением за тем, какие бактерии и грибы появляются в воде.

На третьи-пятые сутки наблюдались снижение пектина с 8,5 до 3,1 %, то есть на 63,5 % и целлюлозы с 49 до 45 %, то есть на 8,2 %. Повышение продолжительности замачивания до семи суток приводило к снижению пектина еще на 12,9 %, но целлюлоза при этом разрушалась заметно больше, уже на 17,8 %. На третьи и пятые сутки в воде обнаружены *Bacillus, Pseudomonas u Paenibacillus.* На седьмые сутки к ним добавились Cellulomonas и Aspergillus. Также, за этот период наблюдалось снижение кислорода с 8,2 до 1,5 мг/л, pH - с 7,5 до 4,5. Вышеуказанные результаты наблюдений привели к выводу, что пять суток обработки являются достаточными. К этому моменту пектиновые связи ослаблены настолько, что волокно отделяется от древесины механически. Установлено, что продолжение процесса дольше смысла не имеет, т.к. целлюлоза начинает разрушаться слишком быстро. Полученные данные дают экспериментальную основу для выбора режима мацерации при переработке конопляного волокна.

Keywords: Industrial cannabis, maceration, water retting, pectin content, cellulose content.

Ключевые слова: Техническая конопля, мацерация, мочка, содержание пектина, содержание целлюлозы.

Introduction

The global development of the textile industry is driving the need to expand sources of fibrous raw materials and create a diverse product assortment. According to the «Materials Market Report 2025» by Textile Exchange, global fiber production reached 125 million tonnes in 2023 and rose to 132 million tonnes in 2024. This expansion in production scale highlights the urgency of securing textile raw material supplies not only through existing sources but also by developing alternative fiber resources. At the same time, the dominance of synthetic materials derived from fossil fuels in the fiber market underscores the importance of research focused on utilizing renewable sources [1].

In the current context, developing new product assortments involves not merely replacing existing fibers entirely, but rather complementing their properties with other fibrous components and expanding their range of applications. Extracting fibers from alternative plant sources for use in yarn and fabric production allows for the diversification of raw material composition while simultaneously enabling control over the structure and performance characteristics of the finished products. The practical value of the raw material in these processes depends on the efficiency of fiber extraction, purification, and preparation for subsequent processing. Consequently, alongside creating new fiber assortments derived from industrial cannabis, it is crucial to refine the processing technologies involved [2].

Industrial *Cannabis* is an annual plant characterized by cellulose-rich bast fibers located in the outer layer of its stalk. These fibers do not exist in isolation within the stalk but rather occur as bundles integrated with the plant's tissues. Pectin-based intercellular layers and other non-cellulosic components facilitate the bonding of these fibers. Therefore, obtaining fiber suitable for textile applications requires separating the bundles from the woody core of the stalk, followed by purification and refinement (thinning) to the necessary degree. The maceration process facilitates

the initial task of separating the fiber bundles from the woody part of the stem, while subsequent mechanical and necessary chemical or enzymatic treatments shape the fiber properties to meet product requirements [3].

Biological maceration is based on the breakdown of connective tissues surrounding fiber bundles through the action of microbial enzymes. Typically, the process is carried out in the field, where the harvested plants are spread out; moisture, temperature, and the activity of microorganisms colonizing the stem surface play crucial roles in this process. During maceration, the degradation of pectic substances weakens the adhesion between tissues. The efficiency of the process depends not merely on the overall extent of degradation, but rather on which structural components are targeted. Specifically, the degradation must be selective: the pectin acting as the binding element should be broken down without damaging the cellulose structure or negatively affecting fiber quality [4].

In recent years, water-based retting processes have also been extensively studied. Notably, a significant approach to controlling water-based maceration was demonstrated in a study by Di Candilo et al. The authors showed that the natural retting process could be accelerated and the quality of the resulting fiber improved through the combined use of selected aerobic and anaerobic pectinolytic bacteria. The scientific significance of the work lies not only in the reduction of processing time but also in the evaluation of the biological treatment results in relation to the condition of the fiber during subsequent mechanical processing. Fibers treated with selected strains were better preserved during the carding process. This result indicates that sufficiently weakening pectin bonds can reduce damage occurring during subsequent mechanical processing [5].

Zhang et al. investigated the dependence of maceration on the aqueous medium and experimentally evaluated the feasibility of using seawater. In the study, a reduction in pectin and hemicellulose content was observed alongside the cleaning of the fiber surface and the separation of fiber bundles. The complementary nature of the results from chemical analysis, infrared spectroscopy, and electron microscopy allowed the process to be explained through structural and morphological evidence, rather than relying solely on changes in external appearance. The authors also isolated bacteria exhibiting pectinolytic activity; however, the use of a single pure culture failed to achieve complete maceration. This result demonstrates that replicating the overall technological efficiency of a complex microbial community is not equivalent to identifying a single enzyme-producing microorganism. While the study by Di Candilo et al. demonstrated the practical efficacy of a selected strain combination, the experiments conducted by Zhang et al. highlighted the combined importance of microbial community composition and environmental characteristics [5, 6].

The approach to maceration at the microbial community level-extending beyond the scope of individual strains-was further developed in the study by Ribeiro et al. By characterizing the bacteria and fungi on *Cannabis* stalks undergoing field retting using molecular methods, the authors determined that while similar microorganisms are present in various samples, their relative proportions differ depending on soil type, harvest time, and the duration of maceration [7].

The shift from analyzing microorganism composition to examining their functional impact is clearly demonstrated in the study by Liu et al. The authors compared traditional field retting with a controlled treatment using the fungus *Phlebia radiata Cel 26*, which possesses low cellulose-degrading capability. The study jointly evaluated enzymatic activity, fiber chemical composition,

and the mechanical properties of fiber-based composites. It was shown that controlled fungal treatment achieved pectin removal and preservation of the cellulosic component more rapidly than field retting. This research indicates that high biological activity alone is insufficient for retting; the selectivity of enzymatic action is of decisive importance [4]. While Di Candilo et al. improved suitability for mechanical processing through bacterial control, Liu et al. deepened the understanding of the enzymatic basis for such control [5,6].

The study by Placet, Day, and Beaugrand provided significant insight into the impact of retting on fiber quality. Following uncontrolled field retting, a deterioration in mechanical properties was observed, alongside a shortening of fiber elements and a reduction in pectinaceous substances. A significant decrease in the total cellulose content was observed, and the authors attributed the decline in mechanical properties to the degradation of hemicelluloses and a reduction in the crystalline cellulose fraction. This result challenges the simplistic interpretation that fiber purification based on pectin degradation inevitably leads to increased strength. Relative enrichment in chemical composition, bundle thinning, and structural integrity are not equivalent parameters. While the study by Liu et al. demonstrated the benefits of selective biological treatment, Placet et al. found that uncontrolled processing can lead to simultaneous external purification and internal structural damage [8].

Subsequent research by Ventorino et al. showed that the prior processing history of the stalk also influences the results of water retting. The authors compared stalks that had undergone preliminary field retting with those subjected to a laboratory water-retting process. Samples that had not undergone preliminary field retting developed a relatively homogeneous microbial community characterized by higher pectinolytic activity. These findings indicate that the sequential application of two biological stages-field retting and water retting-does not automatically enhance their beneficial effects. The scientific contribution of the work lies in demonstrating the importance of the artificial selection of microorganisms during both the initial field-based soaking and the subsequent soaking in an aqueous medium. However, since the addition of nutrient components for these microorganisms was carried out under laboratory conditions, directly transferring this technology to the industrial-scale water-based process presents several challenges. Nevertheless, the research substantiates the view that treating water-based maceration as a stage independent of the stalk's prior condition is incomplete [9].

The present study aimed to determine a suitable duration of water retting for the mechanical separation of fiber bundles from industrial Cannabis stems while limiting the decline in cellulose content. Three treatment periods were compared: 3, 5, and 7 days. Changes in pectin and cellulose contents were examined alongside the occurrence of bacteria and fungi in the retting water, with dissolved oxygen and pH measurements providing additional information on the processing medium. The choice of treatment duration was based on the extent of pectin removal, changes in the cellulose fraction, and the observed separability of fiber bundles from the woody core.

Materials and methods

Stems of freshly harvested industrial *Cannabis* plants were selected as the research material. A water maceration method was employed to evaluate the degradation of pectic compounds and changes in cellulose content within the stems.

Retting to separate the fibrous component from the industrial *Cannabis* stem.

Technical *Cannabis* stalks, after harvesting, are trimmed into sizes of 20 to 80 cm and go through the process of retting. This process takes place in an open container within the temperature range of 18°C to 40°C in a duration of 2 to 7 days. The processing medium is monitored once daily at a fixed time.

Extraction of extractive substances.

To determine the content of extractive substances, samples prepared from air-dried technical *Cannabis* raw material were extracted in a Soxhlet-type extractor using acetone as the solvent.

The sample, pre-dried to a constant mass, was placed in an extraction thimble, and a sufficient volume of acetone was added. The extraction process was conducted for 6 hours. The heating rate was adjusted to ensure a solvent cycle frequency of six times per hour.

After the process of extraction had been completed, the solvent was then removed, and the left-over solid material was dried in an oven at 60ºC until a constant weight was attained. The percentage of extractives was then determined by comparing the initial and final weights of the samples.

The content of extractives was determined using the following formula:

$$W = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\%$$

where:

m_1 - is the mass of the sample before extraction, g;

m_2 - is the mass of the dried sample after extraction, g.

Measurement of the pectin content.

For the selective extraction of pectins from the biomass and fibers of the technical Cannabis plant, an extractant on the basis of the ammonium oxalate-oxalic acid system was used, which allows converting insoluble salts of calcium pectates into the soluble form.

In the course of the experiment, a sample of 50 g of air-dried and powdered biomass was measured and put into a flask that withstands heating. The reagent consisting of 0.5 % ammonium oxalate and 0.5 % oxalic acid in equal volumes was added to the biomass (solid-to-liquid ratio 1:10). Extraction took place in a water bath at 70-75°C within 2 hours with stirring. To completely extract pectic substances, this procedure was performed twice.

The liquid phase thus obtained was separated from the solid by filtration. The resulting solution underwent dialysis through a semipermeable membrane for the removal of salts and reagents of low molecular weight. The dialysis went on till neutralization of pH was attained, with replacement of dialysis water three times a day. The concentrate was obtained from the dialyzate under conditions of reduced pressure with the help of the rotary evaporator. The extraction solution was treated with 85 % ethyl alcohol at a ratio of 1:3 (solution to alcohol) to precipitate the pectin. The precipitate was isolated by centrifuging, washed with 96 % alcohol, and dried in a drying chamber to a constant weight. The mass fraction of the pectin substance was determined according to the following formula:

$$W_{pectin} = \frac{m_p}{m_0} \times 100\%$$

where:

m_0 – initial sample mass, g;

m_p – mass of the dried pectin fraction, g.

Results and discussion

In the bast fibers of industrial hemp stems, cellulose microfibrils within the cell wall form a complex structure in which they are bound with hemicellulose, lignin, and pectic substances (Figure 1). While cellulose microfibrils provide the fiber's primary structural support, non-cellulosic components contribute to maintaining the integrity of this structure and ensuring intercellular bonding.

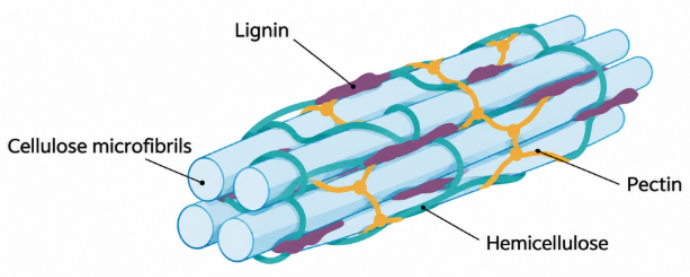


Figure 1. Schematic diagram of the spatial arrangement of cell wall components in technical cannabis bast fiber

Despite the relatively low pectin content in the plant stem, it encapsulates the primary layer of the cell wall. Therefore, a water-retting process was investigated to break down the pectin and separate the fibers from each other and from the woody core. This process was carried out by fully immersing the plant stems in water.

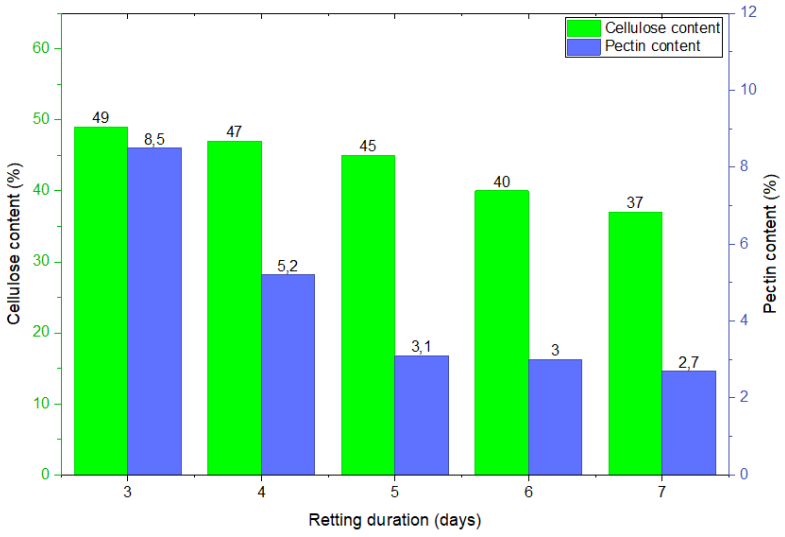


Figure 2. Effect of the water-retting process on the chemical composition of the plant stem

Figure 2 presents the effect of water maceration duration on the pectin and cellulose content of industrial Cannabis stems; it was observed that between the 3rd and 5th days of the process, the pectin content decreased from 8.5 % to 3.1 %, representing a 63.5 % reduction relative to the value

on the third day. During this period, the cellulose content decreased from 49 % to 45 % - a reduction of 8.2 %. This indicates that the decrease in the pectin fraction proceeded more rapidly than that of the cellulose at this stage.

Transition to seven days of maceration caused the decrease of pectin content from 3.1 percent to 2.7 percent, which is equal to a decrease of 12.9 percent in comparison to the pectin content on the fifth day. At the same time, there was a decrease in the percentage of cellulose from 45 % to 37 %, which equals 17.8 percent in comparison to the value registered on the fifth day. From these data it became clear that the changes in the composition of stems do not occur at the same pace in the first and later phases of maceration. In order to study the connection between these changes and microbiological factors, researches were performed aimed at the identification of bacteria and fungi present during maceration and determination of their composition; these results are presented in Table 1.

Table 1. Types of bacteria and fungi identified at various stages of the maceration process

Microorganisms	**Identified microorganisms**		
	Day 3	**Day 5**	**Day 7**
Identified bacteria			
Bacillus	+	+	
Clostridium		+	+
Pseudomonas	+	+	
Cellulomonas			+
Paenibacillus	+	+	
Identified fungi			
Stemphylium	+	+	
Cladosporium	+	+	
Alternaria		+	
Aspergillus			+

Microbiological analysis results revealed changes in the composition of microorganisms identified during the water maceration process. Bacteria belonging to the genera Bacillus, Pseudomonas, and Paenibacillus were detected on the 3rd and 5th days of the process. Literature indicates that representatives of these genera produce pectinase, xylanase, and other hydrolytic enzymes [10-12]. The emergence of microorganisms at this stage is associated with the rapid reduction in the amount of pectin from the 3rd to 5th days, which indicates their possible role in the decomposition of pectic substances.

Microorganisms of the genus Clostridium appeared on the 5th and 7th days, whereas microorganisms of the genus Cellulomonas were detected on the 7th day. The representatives of these genera are distinguished by pectinolytic activity and cellulolytic activity, respectively. It is important to note that the appearance of the bacteria of the genus Cellulomonas during the later stage of the process was accompanied by a decrease in cellulose, which suggests the participation of cellulose enzymatic destruction [13].

There were differences in the fungi depending on the time of the soaking period; namely, the fungi Stemphylium and Cladosporium were found on the 3rd and 5th days, respectively, Alternaria was found on the 5th day, and Aspergillus was found on the 7th day. It has been found from literature sources that the fungi of the first three generations secrete pectinases and hemicellulases, whereas Aspergillus secretes pectinases, hemicellulases, and cellulases [14-17].

To investigate the dynamics of microorganism development during this process, the dissolved oxygen content and pH of the water containing plant stems were analyzed; the results are presented in Table 3.6.

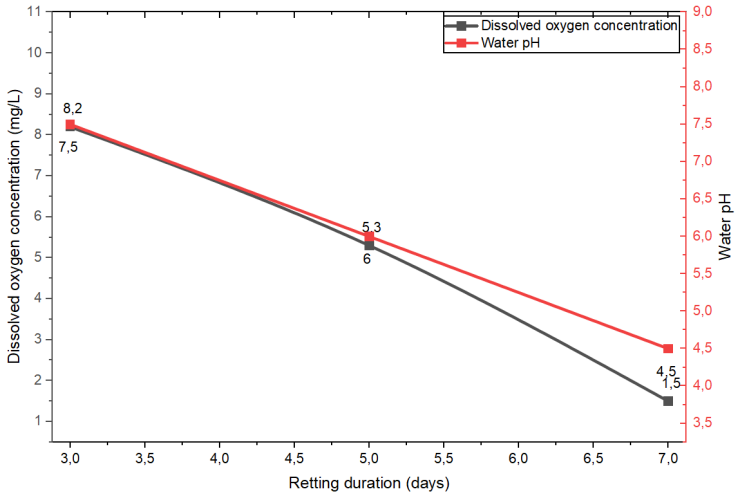


Figure 3. Effect of process duration on the physicochemical properties of the water

From the information, it is evident that the time taken for the process has a significant impact on the physical and chemical characteristics of the water such as the oxygen concentration and pH. Between days 3 – 5, there was a drop in the dissolved oxygen concentration from 8.2 mg/L to 5.3 mg/L (35.4 %) and the pH value changed from 7.5 to 6.0. In this experiment, the occurrence of pectinolytic bacteria is related to the drop in the pectin concentration.

By the seventh day, the oxygen concentration had fallen to 1.5 mg/L and the pH to 4.5; according to the microbiological analysis data, this stage saw the appearance of *Cellulomonas* and *Aspergillus* microorganisms. Their presence was observed concurrently with a decrease in the cellulose fraction from 45 % to 37 % between days 5 and 7, indicating the activity of cellulolytic microorganisms at this stage of the process.

Acetic acid (CH_3COOH) and other organic acids are produced during the enzymatic breakdown of polymers by microorganisms associated with the plant material. In this process, polysaccharides undergo enzymatic degradation, first converting into ethanol, which is subsequently oxidized into acetic acid:

$$C_6H_{12}O_6 \overset{bacteria}{\rightarrow} 2C_2H_5OH + 2CO_2$$

$$C_2H_5OH + O_2 \overset{bacteria}{\rightarrow} CH_3CHO + H_2O$$

$$CH_3CHO + O \overset{bacteria}{\rightarrow} CH_3COOH$$

The resulting acetic acid dissociates in water, increasing the concentration of hydrogen ions (H+) in the medium:

$$CH_3COOH \leftrightarrows CH_3COO^- + H^+$$

Such conditions provide an ideal ground for the bacterial activities. A slightly acid environment is the physiological environment for bacteria where there is a good process of ions transfer through the cell membranes as well as the stabilization of the enzymatic systems. At such pH, all the bacterial hydrolytic enzymes including pectinase, polygalacturonase, xylanase, and ligninase exhibit maximal activity since the ionization of their active sites takes place under acidic conditions. This results in the increasing rate of the polymer hydrolysis and, therefore, fiber disintegration. The H^+ ions produced in the slightly acidic environment create the proton gradient across the cell membrane and, hence, increase the ATP production in bacteria. Therefore, a slightly acidic environment is the main environmental determinant of the efficiency of the retting process.



Figure 4. State of fiber separation from the stalk after the retting process

Based on the obtained results, a duration of 5 days was selected for the water maceration of industrial *Cannabis* stalks. At this stage, there was a reduction in the pectin content to 3.1 %, weakening of the bond between the fiber bundles and the wood component of the stalk, and easy separation mechanically. The termination of the process at the fifth day enabled us to minimize the sharp decrease in the cellulose content that occurred at the later stages.

Conclusion

The study results revealed that the duration of water maceration for industrial *Cannabis* stalks has varying effects on pectin and cellulose content. From the 3rd to the 5th day of maceration, pectin content was reduced from 8.5 % to 3.1 %, which is a decrease of 63.5 %, and the cellulose content dropped by 8.2 %. Extending maceration duration from 5 to 7 days was followed by the additional decrease in pectin content by 12.9 % and cellulose content by 17.8 %.

As follows from the data obtained from the microbiological investigation, during maceration there was the presence of microorganisms which destroy pectin at the initial stages, and microorganisms which destroy cellulose on the 7th day of maceration from the groups of *Bacillus*, *Pseudomonas, Paenibacillus, Cellulomonas*, and *Aspergillus*. This process was accompanied by the

decrease in the concentration of dissolved oxygen from 8.2 to 1.5 mg/L and pH from 7.5 to 4.5. Based on changes in chemical composition and the degree of fiber separation, a maceration duration of five days was selected. Within this timeframe, the weakening of pectin bonds facilitated the mechanical separation of fiber bundles from the woody part of the stem. Concluding the process on the fifth day made it possible to avoid the sharp decline in cellulose content observed with longer processing times and to prepare the fibrous raw material for subsequent processing.

References

1. Textile Exchange. Materials market report [Электронный ресурс]. – 2025. – URL: https://textileexchange.org/knowledge-center/reports/materials-market-report-2025/ (accessed: 16.09.2026).
2. Abdumajidov, A., Mamatvaliyev, I., Nabiyeva, I. & Miratayev, A. (2025b). Studying the Cannabis Sativa L plant and the possibilities of obtaining fiber from it. AIP Conference Proceedings, 3304, 040013. – DOI: 10.1063/5.0269553.
3. Manian A.P., Cordin, M. & Pham, T. Extraction of cellulose fibers from flax and hemp: A review. Cellulose, 28, 8275–8294. – 2021. – DOI: 10.1007/s10570-021-04051-x.
4. Liu, M., Ale M.T. Kołaczkowski, B., Fernando, D., Daniel, G., Meyer A.S., & Thygesen, A. (2017). Comparison of traditional field retting and Phlebia radiata Cel 26 retting of hemp fibres for fibre-reinforced composites. AMB Express, 7, Article 58. – DOI: 10.1186/s13568-017-0355-8.
5. Di Candilo, M., Bonatti P.M., Guidetti, C., Focher, B., Grippo, C., Tamburini, E. & Mastromei, G. (2010). Effects of selected pectinolytic bacterial strains on water-retting of hemp and fibre properties // Journal of Applied Microbiology. – 2010. – Vol. 108, No. 1. – P. 194–203. – DOI: 10.1111/j.1365–2672.2009.04409.x.
6. Zhang L.L., Zhu R.Y., Chen J.Y., Chen J.M. & Feng X.X. Seawater-retting treatment of hemp and characterization of bacterial strains involved in the retting process. Process Biochemistry. – 2008. – Vol. 43, No. 11. – P. 1195–1201. – DOI: 10.1016/j.procbio.2008.06.019.
7. Ribeiro, A., Pochart, P., Day, A., Mennuni, S., Bono, P., Baret, J.-L., Spadoni, J.-L. & Mangin, I. (2015). Microbial diversity observed during hemp retting. Applied Microbiology and Biotechnology, 99, 4471–4484. – DOI: 10.1007/s00253-014-6356-5.
8. Placet, V., Day, A. & Beaugrand, J. The influence of unintended field retting on the physicochemical and mechanical properties of industrial hemp bast fibres // Journal of Materials Science, 52, 5759–5777. – 2017. – DOI: 10.1007/s10853-017-0811-5.
9. Ventorino, V., Chouyia F.E., Romano, I., Mori, M. & Pepe, O. Water retting process with hemp pre-treatment: Effect on the enzymatic activities and microbial populations dynamic. Applied Microbiology and Biotechnology, 108, Article 464. – 2024. – DOI: 10.1007/s00253-024-13300-5.
10. Yao, X., Lin, M., Yan, Y., Jiang, S., Zhan, Y., Su, B., Zhou, Z. & Wang, J. (2025b). Genomic Functional Analysis and Cellulase Characterization for the Enzyme-Producing Strain Bacillus subtilis Y4X3 Isolated from Saline–Alkaline Soil in Xinjiang, China. Microorganisms, 13(3), 552. – DOI: 10.3390/microorganisms13030552.

11. Xu, Z., Peng, B., Kitata R.B., Nicora C.D., Weitz K.K., Pu, Y., Shi, T., Cort J.R., Ragauskas A.J. & Yang, B. (2022b). Understanding of bacterial lignin extracellular degradation mechanisms by Pseudomonas putida KT2440 via secretomic analysis. Biotechnology for Biofuels and Bioproducts, 15(1), 117. – DOI: 10.1186/s13068-022-02214-x.
12. Ljubas B.D., Novak, M., Trontel, A. Rajković, A., Kelemen, Z., Marđetko, N., Grubišić, M., Pavlečić, M., Tominac V.P., & Šantek, B. (2022b). Production of Different Biochemicals by Paenibacillus polymyxa DSM 742 From Pretreated Brewers' Spent Grains. Frontiers in Microbiology, 13, 812457. – DOI: 10.3389/fmicb.2022.812457.
13. Nigel P. Minton, David J. Clarke. Clostridia. Book. 1989, BTHA, volume 3., Lisov A.V., Belova O.V., Lisova Z.A., Vinokurova N.G., Nagel A.S., Andreeva-Kovalevskaya Z.I., Budarina Z.I., Nagornykh M.O., Zakharova M.V., Shadrin A.M., Solonin A.S., & Leontievsky A.A. (2017). Xylanases of Cellulomonas flavigena: expression, biochemical characterization, and biotechnological potential. AMB Express, 7(1), 5. – DOI: 10.1186/s13568-016-0308-7.
14. King B.C., Waxman K.D., Nenni N.V., Walker L.P., Bergstrom G.C. & Gibson D.M. Arsenal of plant cell wall degrading enzymes reflects host preference among plant pathogenic fungi. Biotechnology for Biofuels, 4(1), 4. – 2011. – DOI: 10.1186/1754-6834-4-4.
15. Barbosa, M. a. G., Rehn K.G., Menezes, M., & De Lima R Mariano, R. Antagonism of Trichoderma species on Cladosporium herbarum and their enzimatic characterization. Brazilian Journal of Microbiology, 32(2). – 2001. – DOI: 10.1590/s1517-83822001000200005.
16. García-Calvo, L., Ullán, R., Fernández-Aguado, M., García-Lino, A., Balaña-Fouce, R. & Barreiro, C. (2018). Secreted protein extract analyses present the plant pathogen Alternaria alternata as a suitable industrial enzyme toolbox // Journal of Proteomics, 177, 48–64. – 2018. – DOI: 10.1016/j.jprot.2018.02.012.
17. Bellaouchi, R., Abouloifa, H., Rokni, Y., Hasnaoui, A., Ghabbour, N., Hakkou, A., Bechchari, A. & Asehraou, A. (2021). Characterization and optimization of extracellular enzymes production by Aspergillus niger strains isolated from date by-products // Journal of Genetic Engineering and Biotechnology, 19(1), 50. – 2021. – DOI: 10.1186/s43141-021-00145-y.

METALLURGY, MATERIALS SCIENCE AND MINING

Received: 01.10.2026
Accepted: 17.10.2026
Published: 28.10.2026

УДК 622.7+669.21+669.22

DOI: 10.32743/UniTech.2026.151.10.23570

Development of technology for extracting non-ferrous and precious metals from flotation tailings

Turdiev Shakhboz Shermamat ugli
doctor of Technical Sciences (DSc)
Karshi State Technical University
Republic of Uzbekistan, Karshi
E-mail: shakhbozturdiev@gmail.com
Abdirazakov Akmal Ibragimovich
Associate professor
Karshi State Technical University
Republic of Uzbekistan, Karshi
E-mail: abdirazakov34@gmail.com
Mallayev Shamshod Obidjon o‘g‘li
Assistant
Karshi State Technical University
Republic of Uzbekistan, Karshi
Turdiyev Farid Razzoq o'g'li
Assistant
Karshi State Technical University
Republic of Uzbekistan, Karshi

Разработка технология извлечения цветных и благородных металлов из хвостов флотации

Турдиев Шахбоз Шермамат угли
д-р техн. наук, проф.
Каршинский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Карши
Абдиразаков Акмал Ибрагимович
доц.
Каршинский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Карши

Библиографическое описание: Разработка технология извлечения цветных и благородных металлов из хвостов флотации // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Турдиев Ш.Ш.У. [и др.]. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23570

For citation: Development of technology for extracting non-ferrous and precious metals from flotation tailings // Universum: Technical Sciences : electronic scientific journal. Turdiev S.S.U. et al. 2026. No. 10(151). Available at: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23570

Маллаев Шамшод Обиджон угли
ассистент
Каршинский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Карши
Турдиев Фарид Раззок угли
ассистент
Каршинский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Карши

Abstract

This article addresses the lack of comprehensive technologies in Uzbekistan for processing industrial mineral processing waste to recover valuable components. The study focuses on flotation tailings from the copper processing plant (CPP-2) processing plant, which contain 0.4 g/t gold, 2.1 g/t silver, and up to 0.4 % copper. Based on an analysis of the particle-size distribution of the samples and the distribution of metals across different size fractions, the author proposes a combined approach—integrating mineral processing with hydrometallurgy—to produce a gravity concentrate. This involves a two-stage centrifugal-gravity separation process, followed by the selective treatment of the resulting concentrate using an environmentally friendly ammonia-thiosulfate solution. Optimal process parameters were established: a grind size of 80 % passing 0.074 mm, and ammonia-thiosulfate leaching conditions of 125 g/L $Na_2S_2O_3$, 17 g/L NH_3, 25 g/L $CuSO_4$ •$5H_2O$, a pH of 12.0, a solid-to-liquid ratio of 1:10, a temperature of 25°C, a duration of 2 hours, and a stirring speed of 350 rpm. Activated carbon sorption is proposed for the recovery of precious metals from the resulting solutions. The developed technology achieves an overall recovery rate of up to 70 % for gold, 60 % for silver, and 60 % for copper. It is a cyanide-free, economically efficient process that also helps improve the environmental conditions in regions where such waste has accumulated. Based on these parameters, a combined technological flowsheet for the recovery of gold, silver, and copper has been developed.

Аннотация

В статье рассмотрена проблема отсутствия в Узбекистане комплексных технологий переработки техногенных отходов обогащения для извлечения ценных компонентов. В качестве объекта исследования выбраны хвосты флотации меднообогатительной фабрики (МОФ-2), содержащие 0,4 г/т золота, 2,1 г/т серебра и до 0,4 % меди. Учитывая результаты анализа гранулометрических характеристик полученных автором образцов и распределение металлов по классам размеров, он предлагает сочетание обогащения и гидрометаллургической технологии для получения гравитационного концентрата с использованием двухстадийного центробежно-гравитационного обогащения с последующей селективной переработкой последнего с использованием экологически чистого аммиачно-тиосульфатного раствора. Установлены оптимальные параметры процессов: крупность измельчения – 80 % класса –0,074 мм, и параметры аммиачно-тиосульфатного растворения гравитационного концентрата $Na_2S_2O_3$ 125 g/L, NH_3 17 g/L, $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ 25 g/L, pH=12,0, Т:Ж=1:10, 25°C, 2 часа, 350 об/мин). Для извлечения благородных металлов из растворов предложена сорбция активированным углём. Разработанная технология обеспечивает сквозное извлечение золота до 70 %, серебра – до 60 % и меди – до 60 %, является

бесцианидной, экономически эффективной и позволяет улучшить экологическую обстановку в регионах накопления отходов. На основе определенных параметров также создана комбинированная технологическая схема обогащения золота, серебра и меди.

Keywords: Technogenic waste, flotation tailings, gravity enrichment, centrifugal concentration, ammonium thiosulfate leaching, noble metals, gold, silver, sorption, activated carbon.

Ключевые слова: Техногенные отходы, хвосты флотации, гравитационное обогащение, центробежная концентрация, аммиачно-тиосульфатное выщелачивание, благородные металлы, золото, серебро, сорбция, активированный уголь.

Introduction

Currently, Uzbekistan lacks a comprehensive technology for processing man-made waste and recovering rare and precious metals. This article examines the potential for developing a technology to extract non-ferrous and precious metals from flotation tailings. The study evaluates the effectiveness of beneficiation methods for finely disseminated gold associated with magnetite, quartz, and litharge. Additionally, the selective dissolution of precious metals from the resulting gravity concentrates using an ammonium thiosulfate process—followed by the sorptive separation of the metals—was investigated. A comprehensive integrated processing technology has been developed, combining precious metal recovery with multi-stage separation processes.

Materials and methods

The material selected for study consisted of flotation tailings generated during the processing of copper slags at Copper Concentrator No. 2 in Almalyk. During the research, conducted in collaboration with specialists from the mining and metallurgical complex and adhering to sampling protocols, a total of 60 representative samples were collected from specific horizons at Tailings Dump No. 2 (associated with Concentrator No. 2); with an average of 30 kg of technogenic waste per bag, the total sample mass amounted to 1,800 kg.

Analyzed result(FP method)

No.	Component	Result	Unit	Stat. Err.	LLD	LLQ
1	Cl	0.0800	mass%	0.0006	0.0006	0.0017
2	Na	1.99	mass%	0.119	0.296	0.888
3	Mg	1.40	mass%	0.0191	0.0257	0.0772
4	Al	5.08	mass%	0.0163	0.0092	0.0276
5	Si	25.2	mass%	0.0217	0.0012	0.0037
6	S	0.678	mass%	0.0026	0.0042	0.0127
7	K	2.95	mass%	0.0260	0.0180	0.0540
8	Ca	4.24	mass%	0.0249	0.0171	0.0512
9	Ti	0.294	mass%	0.0056	0.0108	0.0323
10	V	(0.0088)	mass%	0.0021	0.0059	0.0176
11	Cr	0.0336	mass%	0.0015	0.0036	0.0108
12	Mn	0.313	mass%	0.0041	0.0054	0.0161
13	Fe	52.6	mass%	0.0341	0.0019	0.0057
14	Co	0.119	mass%	0.0065	0.0196	0.0589
15	Cu	0.871	mass%	0.0050	0.0019	0.0056
16	Zn	2.10	mass%	0.0066	0.0013	0.0039
17	As	0.0275	mass%	0.0018	0.0050	0.0151
18	Rb	0.0254	mass%	0.0005	0.0009	0.0027
19	Sr	0.0372	mass%	0.0004	0.0003	0.0009
20	Y	0.0078	mass%	0.0003	0.0008	0.0024
21	Zr	0.455	mass%	0.0053	0.0021	0.0062
22	Mo	0.373	mass%	0.0107	0.0069	0.0206
23	Sn	0.0126	mass%	0.0009	0.0014	0.0042
24	Sb	0.113	mass%	0.0023	0.0016	0.0049
25	Te	(0.0040)	mass%	0.0008	0.0019	0.0058
26	Ba	0.336	mass%	0.0049	0.0059	0.0178
27	Ir	(0.0125)	mass%	0.0018	0.0050	0.0151
28	Pb	0.535	mass%	0.0036	0.0034	0.0102
29	Ac	0.0408	mass%	0.0025	0.0073	0.0218
30	U	(0.0026)	mass%	0.0006	0.0017	0.0052

Spectrum

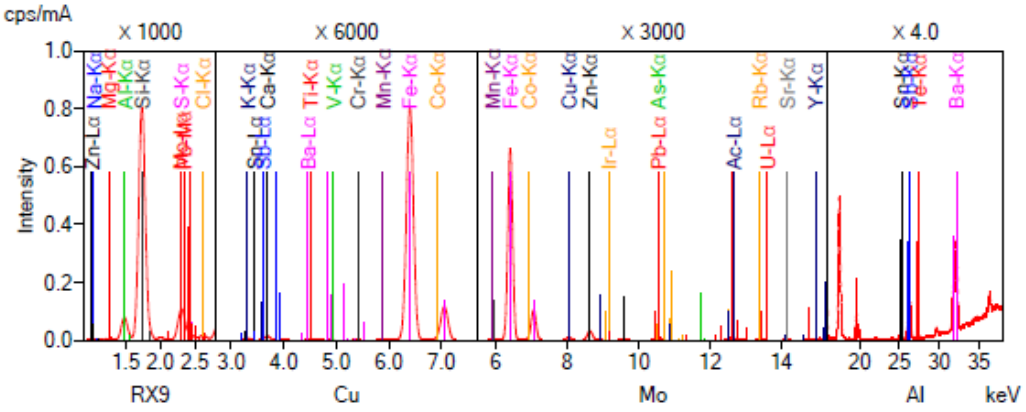


Figure 1. Chemical composition of technogenic waste, sample No. 1

Chemical, mineralogical, and phase analyses of samples derived from flotation tailings were conducted at the Central Analytical Laboratory (CAL) and the laboratory of the Uzbekistan-Japan Youth Center. Samples from the CPP-2 tailings storage facility were collected at various depths; following initial assaying, quartering, and blending, ten separate composite samples were prepared for chemical and mineralogical analysis. The prepared samples were analyzed using a Rigaku NEX CG energy-dispersive X-ray fluorescence spectrometer. Figure 1 shows the spectrum of a pre-blended sample, indicating that the copper content in the technogenic waste is 0.871 wt% [4; 3].

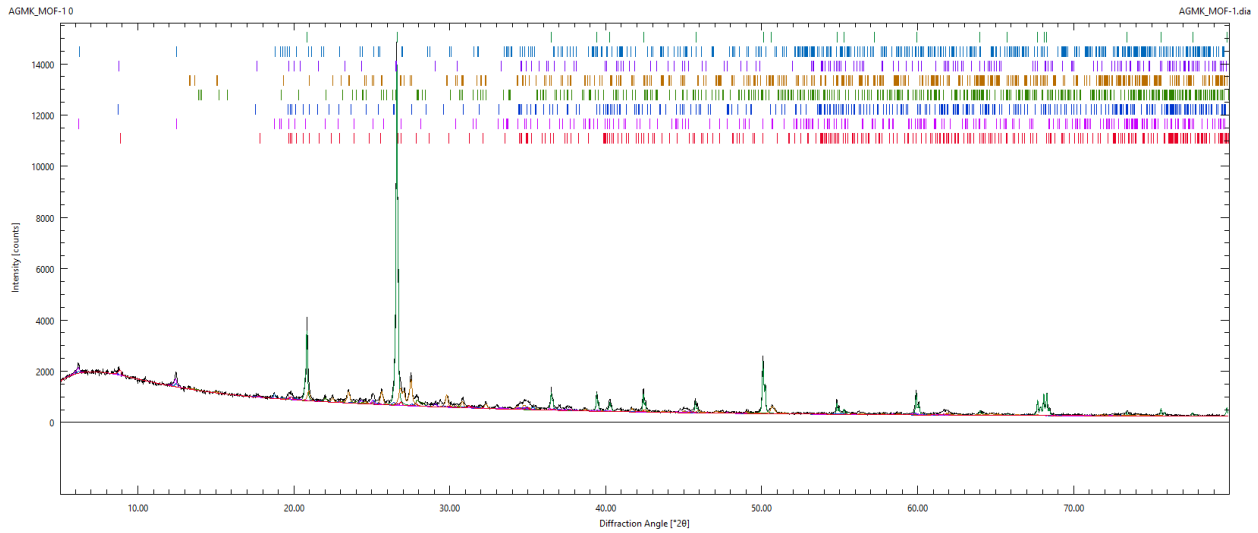


Figure 2. X-ray diffraction pattern of CPP-2 tailings (identified minerals: quartz, albite, muscovite, chrysocolla, chalcopyrite)

A synthesis of the X-ray phase analysis results reveals that oxide mineralization is closely associated with iron sulfide minerals and remains in the tailings phase rather than partitioning into the concentrate during copper flotation. At the same time, valuable elements such as copper, lead, tungsten, gold, and silver are retained within their composition..

The results of the aforementioned analysis serve as the basis for experiments on the gravity concentration of precious metals using centrifugal concentrators (Knelson KC-MD3, Knelson GX9), leading to the determination of an optimal particle size for the -0.074 mm fraction in the range of 80–85 % [9]..

Extensive research, comprising a series of tests and experiments, led to the development of a new process flowsheet for the two-stage centrifugal concentration of the bulk of the gold, silver, and copper from flotation tailings. The results of the centrifugal beneficiation are presented in Table 1; tests were conducted using identical feed samples while varying the product yield, rotational speed, and water flow rate, thereby establishing a basis for determining the optimal centrifugal beneficiation parameters.

Table 1. Results of centrifugal beneficiation of CPP-2 tailings (Stage II: Knelson, G=120, water flow rate 5 l/min, particle size -0.074 mm 80 %)

Products	Mass, g	Yield, %	Content, %				Recovery, %			
			Au, g/t	Ag, g/t	Cu	Ss	Au	Ag	Cu	Ss
Results of gravity separation of sample No.5										
Concentrate 1	220	2,2	10,63	26,96	1,72	1,46	58,44	28,24	12,22	3,37
Concentrate 2	210	2,1	2,77	40,22	3,63	3,37	14,54	40,22	24,56	7,45
Lunch concentrate	**430**	**4,3**	**6,79**	**33,43**	**2,65**	**2,39**	**72,98**	**68,46**	**36,78**	**10,82**
Tails	9570	95,7	0,11	0,69	0,20	0,89	27,02	31,54	63,22	89,18
Tailings CC-2	10000	100	0,4	2,1	0,31	0,95	100	100	100	100
Results of gravity separation of sample No.6										
Concentrate 1	198	1,98	11,47	29,93	2,46	2,51	56,78	28,22	15,71	5,24
Concentrate 2	242	2,42	3,18	**38,28**	3,62	3,55	19,25	44,11	28,27	9,04

Products	Mass, g	Yield, %	Content, %				Recovery, %			
			Au, g/t	Ag, g/t	Cu	Ss	Au	Ag	Cu	Ss
Lunch concentrate	**440**	**4,4**	**6,91**	**34,52**	**3,10**	**3,08**	**76,03**	**72,33**	**43,98**	**14,28**
Tails	9560	95,6	0,10	0,61	0,18	0,85	23,97	27,67	56,02	85,72
Tailings CC-2	10000	100	0,4	2,1	0,31	0,95	100	100	100	100
Results of gravity separation of sample No.7										
Concentrate 1	200	2	10,63	19,45	2,87	3,32	53,14	21,56	18,52	6,98
Concentrate 2	220	2,2	4,10	44,60	4,14	7,14	22,56	46,72	29,36	16,54
Lunch concentrate	**420**	**4,2**	**7,21**	34,14	**3,53**	**5,32**	**75,7**	**68,28**	**47,88**	**23,52**
Tails	9580	95,8	0,10	0,70	0,17	0,76	24,3	31,72	52,12	76,48
Tailings CC-2	10000	100	0,4	2,1	0,31	0,95	100	100	100	100
Results of gravity separation of sample No.8										
Concentrate 1	245	2,45	9,57	25,62	2,68	3,87	58,62	29,89	21,22	9,99
Concentrate 2	260	2,6	3,45	36,29	4,10	7,72	22,42	44,93	34,36	21,12
Lunch concentrate	**505**	**5,05**	**6,42**	**31,11**	**3,41**	**5,85**	**81,04**	**74,82**	**55,58**	**31,11**
Tails	9495	94,95	0,08	0,56	0,15	0,69	18,96	25,18	44,42	68,89
Tailings CC-2	10000	100	0,4	2,1	0,31	0,95	100	100	100	100
Results of gravity separation of sample No.9										
Concentrate 1	233	2,33	9,75	25,72	3,28	3,90	56,82	28,54	24,66	9,56
Concentrate 2	220	2,2	4,48	46,72	5,20	7,20	24,62	48,94	36,88	16,67
Lunch concentrate	**453**	**4,53**	**7,19**	**35,92**	**4,21**	**5,50**	**81,44**	**77,48**	**61,54**	**26,23**
Tails	9547	95,47	0,08	0,50	0,12	0,73	18,56	22,52	38,46	73,77
Tailings CC-2	10000	100	0,4	2,1	0,31	0,95	100	100	100	100

Gravity separation results for flotation tailings indicate that increasing the water flow rate during the second stage of centrifugal concentration facilitates the effective recovery of silver and copper—owing to their low densities—thereby enhancing the overall recovery rates of these metals. These findings led to the determination of optimal operating parameters for the second gravity separation stage, specifically regarding the adjustment of Knelson concentrator rotor speeds [1].

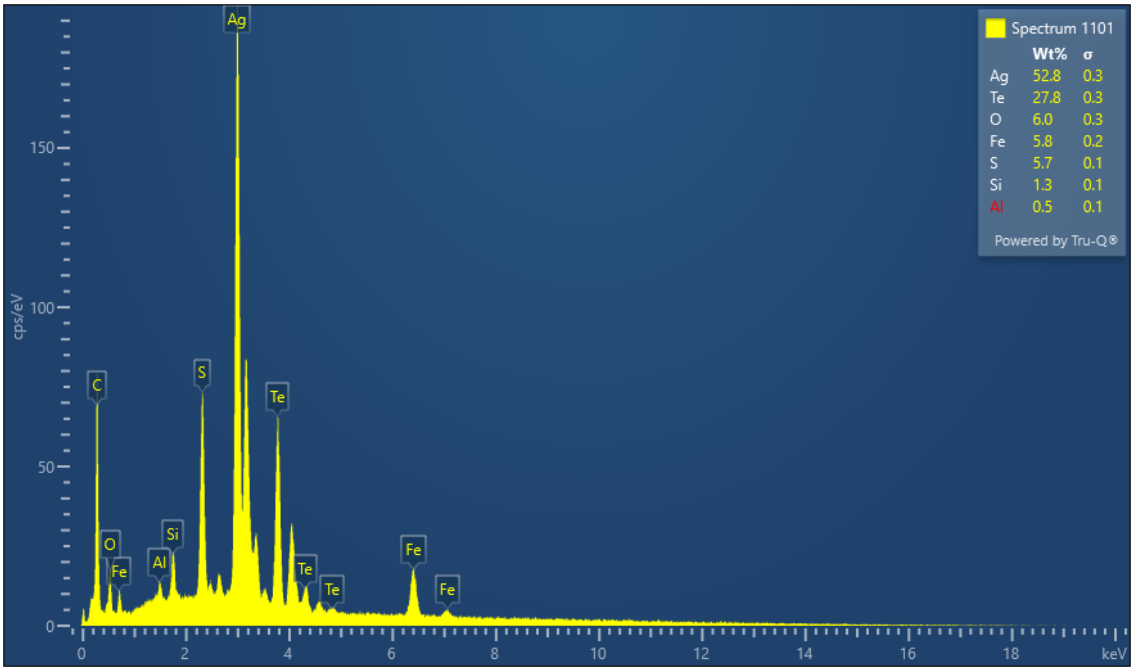


Figure 3. SEM images and EDS spectrum showing silver detection in the concentrate from the processing of CPP-2 tailings

Energy-dispersive analysis and the determination of the mode of occurrence of gold, silver, and copper via SEM and EDS provide a basis for selecting the appropriate method for processing the concentrates. Since, in both cases, gold and silver are present in fine fractions as compounds with tellurium and iron minerals, processing a gravity concentrate of this composition—followed by smelting in converter furnaces—is not viable; this is because such a process results in the loss of precious metals to the slag—the very same pathway by which these metals originally entered the feed material from the CPP-2 tailings..

Results and discussion

In the traditional cyanidation of gravity concentrates derived from copper processing plant tailings, the presence of sulfide minerals (such as pyrite and chalcopyrite) leads to the formation of thiocyanates and increases cyanide consumption. To address this, a new hydrometallurgical processing approach—ammonia-thiosulfate leaching ($Cu–NH_3–S_2O_3^{2-}$)—was investigated; this method serves as an environmentally safe alternative that exhibits selectivity for gold in the presence of copper. The process mechanism relies on the formation of the stable $[Au(S_2O_3)_2]^{3-}$ complex, with Cu^{2+} ions acting as an oxidizing catalyst [5]..

Preliminary experiments were conducted using a sodium thiosulfate ($Na_2S_2O_3$) solution concentration of 0.2–2 M, a solid-to-liquid (S:L) ratio of 1:5, a dissolution time of 1 h, a temperature of 25°C, a stirring speed of 400 rpm, and a pH of 10. The gold content in the initial concentrate was 7.19 g/t, and the silver content was 35.92 g/t..

Our studies on the duration of the leaching process showed that during the first hour of dissolution, the bulk (70–80 %) of the readily soluble gold passes into solution; subsequently, extending the process to 12 hours increases total dissolution by only up to 15 %. Prolonging the process entails additional costs and leads to increased copper dissolution..

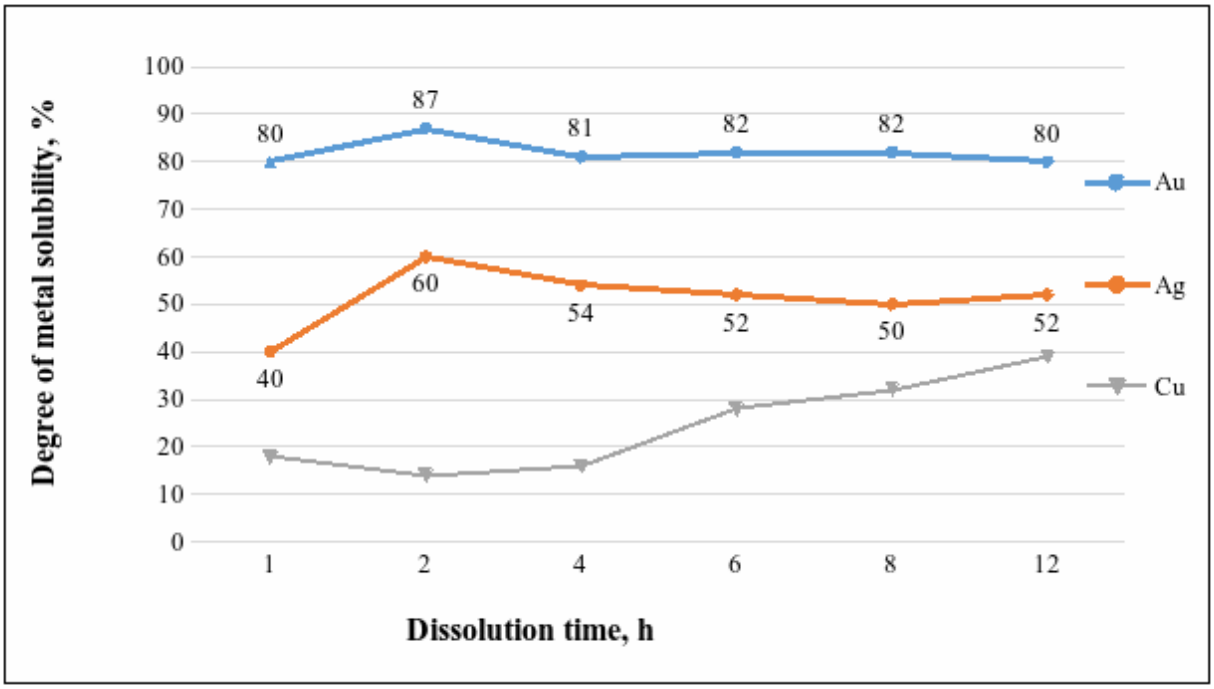


Figure 4. Dependence of the degree of metal dissolution on time

Based on the relationship shown in Figure 4, a duration of 2 hours was selected as the optimal time interval. Applying the identified parameters to the specified experimental conditions yielded the following settings: thiosulfate concentration of 125 g/L $S_2O_3^{2-}$ and 17 g/L NH_3; Cu^{2+} ion concentration of 25 g/L; stirring speed of 350 rpm; pH 12; pulp density of 10 % (solid-to-liquid ratio 1:10); temperature of 25°C; and dissolution time of 2 hours. The experiments demonstrated that, under these optimized conditions, metal recovery rates into the solution were 87 % for gold, 60 % for silver, and 14 % for copper. In the thiosulfate-ammonia system, gold and silver form anionic complexes ($[Au(S_2O_3)_2]^{3-}$ and $[Ag(S_2O_3)_2]^{3-}$).

The next task involved the recovery of noble metals from a thiosulfate solution; we selected a sorption method using activated carbon as the sorbent. The sorption capacity of activated carbon is determined by its porous structure and the functional groups (carboxyl, hydroxyl, and carbonyl) present on its surface.

The thiosulfate solutions were obtained after a settling stage; since the pH level significantly influences the sorption process, determining the optimal alkaline environment is a critical factor. Given that the initial solution pH reached 12.0—and in some cases 12.5—our experiments were conducted within the pH range of 9 to 12.5. A 10 g/L sulfuric acid solution was used to lower the pH, while an aqueous NH3 solution was used to raise it..

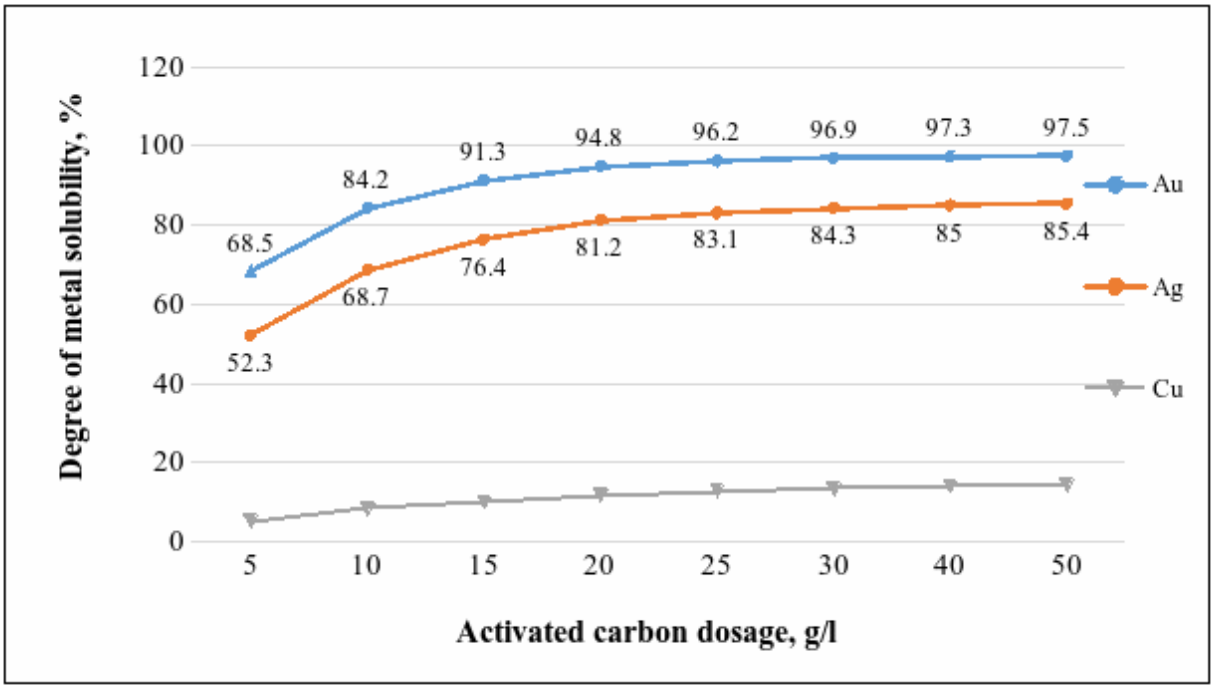


Figure 5. Effect of coal dosage on metal sorption (time = 8 hours, pH = 10.5)

When determining the solution pH, it was necessary to assess the impact on the stability of thiosulfate complexes and, primarily, on the degree of ionization of functional groups on the activated carbon surface. This is because high pH values reduce the extent of sorption by blocking the activated carbon surface, whereas excessively low pH levels lead to the additional decomposition of gold compounds and reduced sorption efficiency due to the destabilization of the thiosulfate solution system.

We investigated a method for the sorption of gold and silver onto activated carbon. This approach relies on the globally established practice of desorbing gold and silver from loaded activated carbon in a highly alkaline medium at elevated temperatures (60–80°C). Using this technology, gold can be transferred into solution as a marketable regenerate (eluate), and an anodic precipitate can be recovered by precipitating the gold and silver from the solution. The resulting high-purity anodic precipitates are melted into an alloy, which serves as the feedstock for producing 99.99 % pure gold and silver ingots via electrolysis [2].

Conclusion

Comprehensive studies have established that the technogenic waste from MOF-2 contains 0.40–0.41 g/t gold, 1.84–2.35 g/t silver, and 0.24–0.4 % copper. The primary processing challenge stems from the distribution of gold and silver—occurring mainly as free particles (10–80 μm) and as fine particles (<20 μm) associated with oxide and sulfide minerals—and the coexistence of copper in both oxide (CuO, Cu_2O) and sulfide (chalcopyrite, bornite) forms [7].

The proposed combined process flow scheme (see Fig. 6) is based on the following fundamental principles:

• primary concentration of gold and silver via gravity separation of tailings;

• selective hydrometallurgical processing of gravity concentrate via ammonia-thiosulfate dissolution;

• sorption of gold and silver from solution using activated carbon;

• recovery of copper from the solution after sorption and regeneration of reagents.

The proposed combined technology (Stage II gravity separation + selective ammonia-thiosulfate leaching) enables the recovery of gold from CPP-2 technogenic waste with an overall recovery rate of 70 %, and up to 60 % for copper.

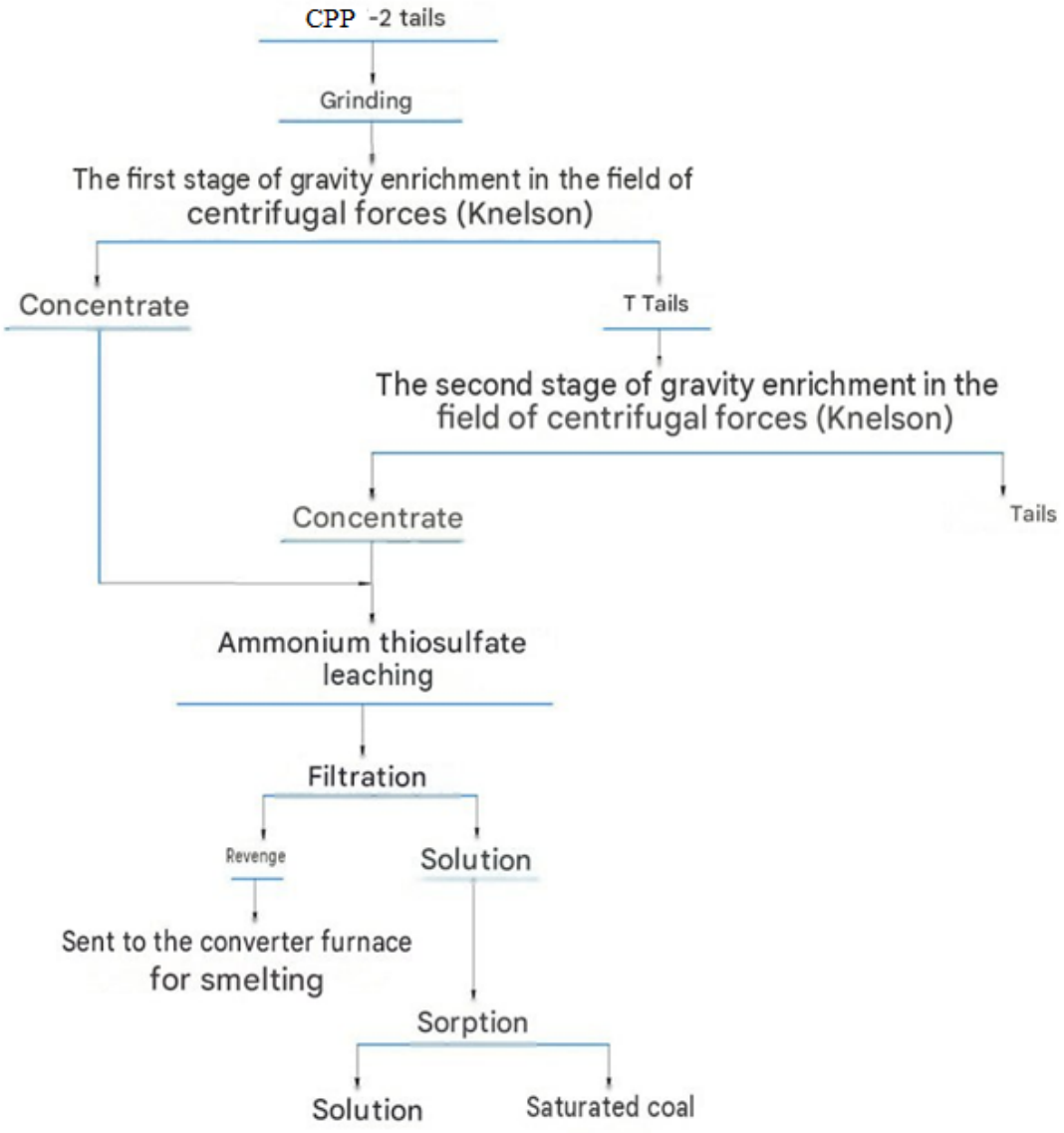


Figure 6. Proposed process flow diagram for the recovery of gold, silver, and copper from man-made waste

This technology is cyanide-free, environmentally safe, and cost-effective; it is a scientifically grounded method for the comprehensive processing of man-made waste [4]. Implementing this technology will yield undeniable economic benefits through the additional recovery of valuable components and will improve the environmental situation at sites where man-made waste has accumulated.

References

1. Gulyamov B.Kh., Kholmatov M.T. Improving the efficiency of processing technogenic waste from copper processing plants using centrifugal separation // Navoi State University of Mining and Technology. – 2025. – P. 49–50.
2. Kim V.P., Sadykov A.A. Study of the kinetics of leaching of precious metals from refractory gravity concentrates in thiosulfate-ammonia solutions // National University of Science and Technology MISiS. – 2022. – P. 67–68.
3. Khursanov A.Kh., Kharsanov A.S. Prospects for the development of rare metal production in the Almalyk MMC mine. International scientific and practical conference «Modern problems and innovative technologies for resolving issues of processing technological deposits of the Almalyk MMC», 2019. – P. 94–96.
4. Abdirazakov A.I. Development of an optimal technological regime for the enrichment of non-ferrous and rare metals from technogenic raw materials. Dissertation. Karshi State Technical University. –P. 50–65; 85–89; 117. – 2026.
5. Abdullayev O.T., Normatov I.Sh. Improving the technology of extracting non-ferrous metals from technogenic waste by flotation and hydrometallurgy // Tashkent State Technical University. – 2024. – P. 84–85.
6. Lee S.H., Kim Y.J., Park C.W. Recovery of base and precious metals from copper smelter flotation tailings using combined gravity and hydrometallurgical routes // Minerals Engineering. – 2024. – Vol. 189. – P. 107–118.
7. Rakhmonov Sh.S., Karimova D.Kh. Assessment of the ecological and economic efficiency of processing technogenic residues in areas contaminated with heavy metals // National University of Uzbekistan. – 2023. – P. 109–112.
8. Smith J., Brown R. Thiosulfate leaching of gold and silver from gravity concentrates: kinetics and optimization // International Journal of Mineral Processing. – 2023. – Vol. 215. – P. 112–125.
9. Zhang J., Han J., Liu W. et al. Mineralogical characterization and recovery of gold from a refractory gold concentrate // Minerals. – 2022. – Vol. 12, No. 8. – DOI: 10.3390/min12081010.
10. Sanakulov Q.S., Doniyarov N.A., Saidakhmedov A.A.Q.S. Sanakulov, N.A. Doniyarov, A.A. Saidakhmedov. Fundamentals of enrichment and processing of minerals. Textbook. P. 277–291. – Navoi: «Aziz kitobhon», 2021.

FOOD TECHNOLOGY AND FOOD INDUSTRY

Received: 12.10.2026
Accepted: 20.10.2026
Published: 28.10.2026

УДК 665.1.09

DOI: 10.32743/UniTech.2026.151.10.23593

Research of physical and chemical properties of waste cooking oils

Maripova Fotima Shakarbek kizi
Independent researcher
Department of technology of food, perfumery, and cosmetic products, Tashkent institute of chemical technology
Uzbekistan, Tashkent
E-mail: maripovafotima@gmail.com

Ruzibayev Akbarali Tursunboyevich
DSc in Engineering, Professor
Head of the department of technology of food, perfumery, and cosmetic products, Tashkent institute of chemical technology
Uzbekistan, Tashkent
E-mail: akbar240983@gmail.com

Исследование физико-химических свойств отработанных растительных масел

Марипова Фотима Шакарбек кизи
самостоятельный соискатель
кафедра технологии пищевых, парфюмерно-косметических продуктов, Ташкентский химико-технологический институт
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Рузибаев Акбарали Турсунбоевич
д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой технологии пищевых, парфюмерно-косметических продуктов, Ташкентский химико-технологический институт
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Библиографическое описание: Марипова Ф.Ш. кизи, Рузибаев А.Т. Исследование физико-химических свойств отработанных растительных масел // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23593

For citation: Maripova F.S.K., Ruzibayev A.T. Research of physical and chemical properties of waste cooking oils // Universum: Technical Sciences : electronic scientific journal. 2026. No. 10(151). Available at: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23593

Abstract

This study investigated the physicochemical properties of waste cooking oils generated during food preparation in restaurants and street food outlets in Tashkent, Uzbekistan. To comprehensively assess the quality of the investigated oils, acid value, peroxide value, color, moisture content, viscosity, density, and fatty acid composition were determined. The results showed that in waste cooking oil samples collected from restaurants, the acid value ranged from 2,68 to 3,22 mg KOH/g, the peroxide value ranged from 10,8 to 12,7 mmol O_2/kg, and the moisture content varied from 0,85 % to 0,91 %. Higher values of these parameters were observed in oil samples collected from street food outlets, indicating differences in the degree of oil quality deterioration depending on the conditions of use. It was also established that the viscosity and density of the investigated oils decreased with increasing temperature. Analysis of the fatty acid composition revealed that oleic, linoleic, palmitic, and stearic acids were the predominant fatty acids. The findings have scientific and practical significance for assessing the quality of waste cooking oils, selecting appropriate processing methods, and identifying promising ways of their effective utilization for technical purposes. The results may serve as a basis for developing technological solutions aimed at the rational use of secondary oil and fat resources and reducing the negative environmental impact of waste.

Аннотация

В настоящем исследовании изучены физико-химические свойства отработанных растительных масел, образующихся в процессе приготовления пищи в ресторанах и точках уличного питания города Ташкента. Для комплексной оценки качества исследуемых масел определяли кислотное и перекисное числа, цвет, содержание влаги, вязкость, плотность, а также жирнокислотный состав. Установлено, что в образцах отработанных растительных масел, отобранных в ресторанах, кислотное число находилось в диапазоне от 2,68 до 3,22 мг KOH/г, перекисное число составляло от 10,8 до 12,7 ммоль O_2/кг, а содержание влаги варьировало от 0,85 до 0,91 %. В образцах масел, полученных в точках уличного питания, наблюдались более высокие значения указанных показателей, что свидетельствует о различиях в степени изменения качества масел в зависимости от условий их использования. Также установлено, что с повышением температуры вязкость и плотность исследуемых масел снижались. Анализ жирнокислотного состава показал, что основную долю составляли олеиновая, линолевая, пальмитиновая и стеариновая кислоты. Полученные результаты имеют научно-практическое значение для оценки качества отработанных растительных масел, обоснованного выбора способов их дальнейшей переработки и определения перспективных направлений их эффективного использования в технических целях. Результаты исследования могут служить основой для разработки технологических решений, направленных на рациональное использование вторичных масложировых ресурсов и снижение негативного воздействия отходов на окружающую среду.

Keywords: waste cooking oil, acid value, peroxide value, color, viscosity, density, fatty acid composition.

Ключевые слова: отработанное масло, кислотное число, перекисное число, цвет, вязкость, плотность, жирнокислотный состав.

Introduction

Vegetable oils are widely used in households, restaurants, and the food industry for frying and thermal processing. During frying, the oil acts as a heat transfer medium and imparts a distinctive taste, aroma, and texture to the finished product. However, repeated heating at high temperatures leads to changes in the composition and quality of the oils, limiting their suitability for further use in cooking [1, pp. 2–7; 2, pp. 5744–5765].

The primary chemical processes occurring during frying include oxidation, hydrolysis, and lipid polymerization[3, pp. 4665–4696; 4, pp. 145–157; 5, pp. 2-6]. These reactions can lead to the accumulation of free fatty acids, primary and secondary oxidation products, cyclic compounds, dimers, and polymers. Consequently, the oil may become darker, more viscous, and chemically less stable. The rate and extent of these changes depend on the frying temperature, the duration and frequency of use, the fatty acid composition, exposure to oxygen, and the characteristics of the product being fried [1, pp. 3–9; 2, pp. 5744–5765]. Studies have shown that prolonged heating can lead to an increase in the total content of polar compounds and changes in the fatty acid composition of the oils [6, pp. 1–5].

Therefore, the physicochemical characterization of used vegetable oils is important for assessing their condition and determining appropriate options for their subsequent disposal. Parameters such as acid value, peroxide value, moisture content, insoluble impurities, viscosity, color, and fatty acid composition provide information regarding the degree of oil degradation and its technological properties. Specifically, the acid value reflects the content of free fatty acids, while the peroxide value is used to assess the level of primary oxidation products. Since peroxide compounds can decompose during advanced stages of oxidation, this parameter should be interpreted in conjunction with other quality indicators [1, pp. 3–9; 7, pp. 5–8]. Depending on their composition, level of contamination, and the requirements of specific technological processes, waste vegetable oils can serve as secondary raw materials for the production of biodiesel, soap, and other non-food products[8, pp. 1-15]. Effective disposal requires the selection of appropriate processing methods and a preliminary assessment of their properties to determine potential applications[9, pp. 96-102; 10, pp. 55-76]. Therefore, this study investigates the physicochemical properties of waste cooking oils to characterize their quality and evaluate their suitability for further technological processing.

Materials and methods

Raw materials. The raw materials utilized in this study consisted of waste cooking oil (WCO) collected from various restaurants and street food vendors in Tashkent city. These oils had been primarily used for deep-frying processes, with an unspecified number of frying cycles. The samples were discarded as waste by the establishments only after undergoing significant sensory degradation, specifically exhibiting undesirable alterations in color and odor.

Determination of moisture and volatile matter content. The mass fraction of moisture and volatile matter is determined using a gravimetric method. A sample of known mass is dried in a drying oven (UN30, Germany) until a constant mass is achieved. The initial weighing is performed after two hours, with subsequent weighings carried out every hour. The drying process is considered complete when the difference between the results of two consecutive weighings does not exceed 0.002 g. The mass fraction of moisture and volatile components is calculated based on the difference between the sample's mass before and after drying.

Determination of the density of oils. The density of the oil samples was determined using a hydrometer. Each oil sample was transferred into a clean, dry measuring cylinder and brought to the specified temperature. The hydrometer was carefully immersed in the sample, ensuring that it did not touch the walls of the cylinder. Once the hydrometer had stabilized, the scale reading was recorded. Since oil density varies with temperature, the sample temperature was also recorded at the time of measurement. The density of each oil sample was then determined based on the recorded reading.

Determination of the viscosity of oils. The viscosity of the oil samples was measured using a HAAKE VT 1 plus viscometer. Each sample was placed in a clean measuring container and brought to the specified temperature. The viscometer was prepared for operation in accordance with the manufacturer's instructions, and spindle No. 3 was selected and immersed in the sample. After the instrument was started, the reading was allowed to stabilize before the viscosity value was recorded. Throughout the measurement, the sample temperature and instrument operating conditions were kept constant. The results were used to characterize the viscosity of the oil samples.

Determination of the acid value of the oil. The acid value is used to assess the degree of hydrolytic degradation of the oil. The method is based on titrating the free fatty acids in the oil with an alcoholic KOH solution in the presence of phenolphthalein. The result is converted to the amount of KOH in milligrams (mg) and expressed per gram of oil. The mass fraction of free fatty acids is calculated based on the acid value.

Determination of the peroxide value. The peroxide value is determined to assess the degree of oil oxidation. The analysis is based on titrating the iodine – liberated through the reaction of hydroperoxides in the oil with potassium iodide – using a sodium thiosulfate solution. An increase in the peroxide value indicates an intensification of the primary oxidation process in the oil. This state reflects the occurrence of oxidation, hydrolysis, and polymerization processes within the oil during frying.

Determination of anisidine number. The anisidine number is determined to estimate the amount of secondary oxidation products, mainly aldehydes, in oil. The method according to GOST 31756–2012 is based on measuring the optical density of an oil sample solution after the reaction with a solution of para-anisidine in acetic acid at a wavelength of 350 nm. An increase in the anisidine number indicates the accumulation of secondary oxidation products in the oil. This allows you to assess the degree of deterioration of the oil as a result of oxidation during frying.

Determination of fatty acid composition. The qualitative and quantitative fatty acid composition of the used oil and finished products is determined using gas chromatography(Shimadzu Nexis GC-2030 with SP-2560 capillary column (100 m × 0.25 mm × 0.2 μm)). Prior to analysis, the triacylglycerols in the oil are converted into fatty acid methyl esters.

The resulting methyl esters are separated via gas chromatography, and they are identified by comparing their retention times with those of standard samples. Quantitative composition is calculated using an internal or external standard.

Changes in the fatty acid composition of used oils resulting from heating – including the formation of trans-fatty acids – were investigated.

Determination of the color of oils. The color of oils was determined using a Lovibond instrument in accordance with the method specified in GOST 5477. The sample is poured into a cuvette of appropriate path length, which is then placed into the instrument's cell compartment; the lid is closed, and the color of the sample is immediately determined using a set of standard colored glass filters. To obtain an initial estimate, glass filters with a yellow-to-red ratio of 10.0:1.0 are selected. This ratio is then adjusted – minimizing the use of blue or neutral filters – until an exact color match is achieved (note that blue and neutral filters must not be used simultaneously; the values should not exceed 9.0 for blue or 3.0 for neutral filters). The test must be performed twice. The final result is the arithmetic mean of the values obtained from both tests. If the values from the two tests differ significantly, a third test is conducted, and the two closest values among the three are used for the calculation. The result is expressed as the number of red, yellow, and blue (or neutral) units, along with an indication of the optical path length of the cuvette used.

Number of Replicates and Statistical Analysis. The analyzed parameters of each waste cooking oil sample was determined in triplicate (n = 3). The results were expressed as the arithmetic mean ± standard deviation (mean ± SD). Statistical processing was performed using the results of three replicate measurements for each sample.

Results and discussion

Oils used in restaurants and street food in Tashkent were analyzed. The results of the analysis are presented in Table 1.

Table 1. Physical and chemical properties of waste cooking oils

Sample	Acid value, mg KOH/g	Peroxide value, mmol O_2/kg	Color, red units	Moisture and volatile matter content, %	Anisidine value
restaurant 1	3,22	10,8	16,3	0,85	25,3
restaurant 2	2,68	12,7	18,5	0,91	24,5
street food 1	3,52	11,2	21,1	1,21	28,6
street food 2	4,17	16,4	23,7	1,32	24,6

According to the data in Table 1, the acid value of restaurant waste oils was 2.68 – 3.22 mg KOH/g, peroxide value 10.8 – 12.7 mmol O_2/kg, color 16.3 – 18.5 red units, anisidine value 24.5 – 28.6 and moisture content 0.85 – 0.91 %. The acid value of street food waste oils was 3.52 – 4.17 mg KOH/g, peroxide value 11.2 – 16.4 mmol O2/kg, color 21.1 – 23.7 red units, and moisture content 1.21 – 1.32 %.

Viscosity and density are important physical properties of fats and oils. Repeated use of oils at high temperatures can lead to an increase in viscosity due to chemical changes in the fatty acids. An increase in viscosity can also result from the dissolution of various substances in the oil during the cooking process. Therefore, in subsequent experiments, the density and viscosity of the oil samples were analyzed at various temperatures; the results obtained are presented in Figures 1 and 2.

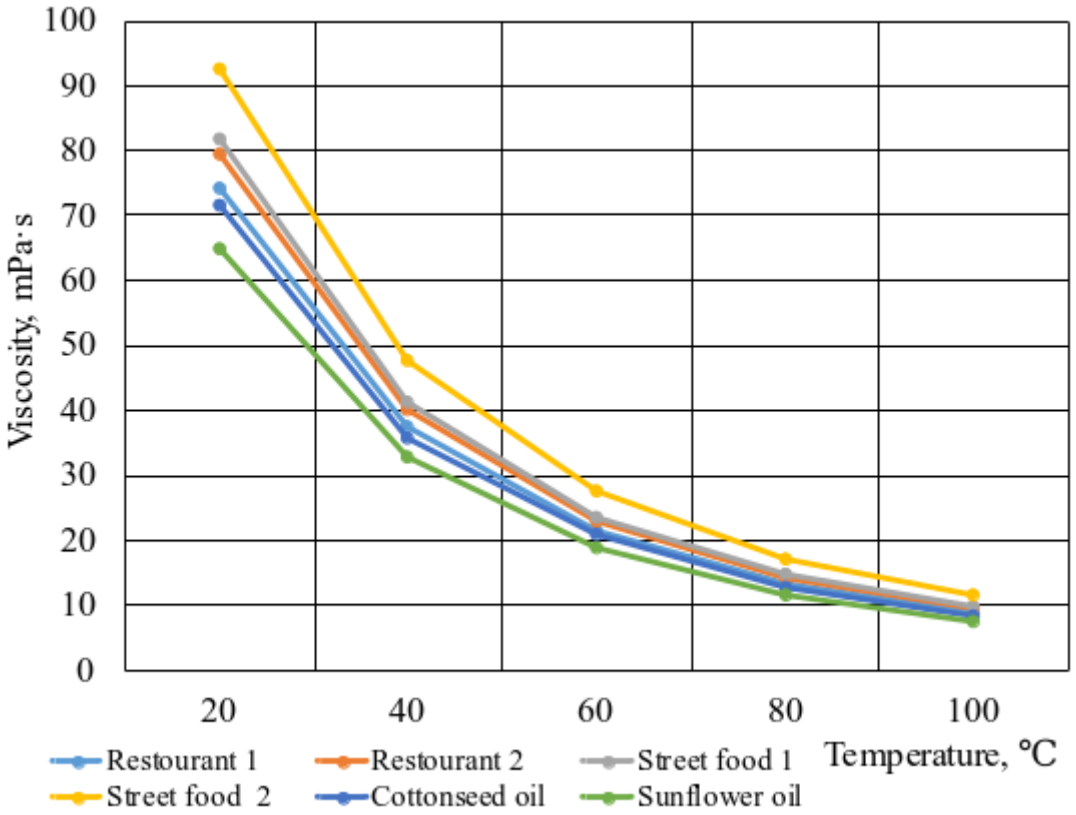


Figure 1. Viscosity of waste cooking oils at different temperatures (mPa·s)

The data in Figure 1 indicate that the density of the waste cooking oils was higher than that of fresh sunflower and cottonseed oils. Among the waste cooking oils, the highest viscosity was observed in the «Street Food 2» sample, while the lowest was found in the «Restaurant 1» sample. The viscosity of all oil samples decreased as the temperature rose. For instance, the viscosity of the «Street Food 2» sample was 92.5 mPa·s at 20°C but decreased to 11.7 mPa·s at 100°C. At 20°C, the viscosity of the used vegetable oils ranged from 74 to 93 mPa·s; this is significantly higher than the viscosity of fresh cottonseed and sunflower oils. This phenomenon is attributed to the presence of polymerized triglycerides and oxidation products in the waste cooking oils.

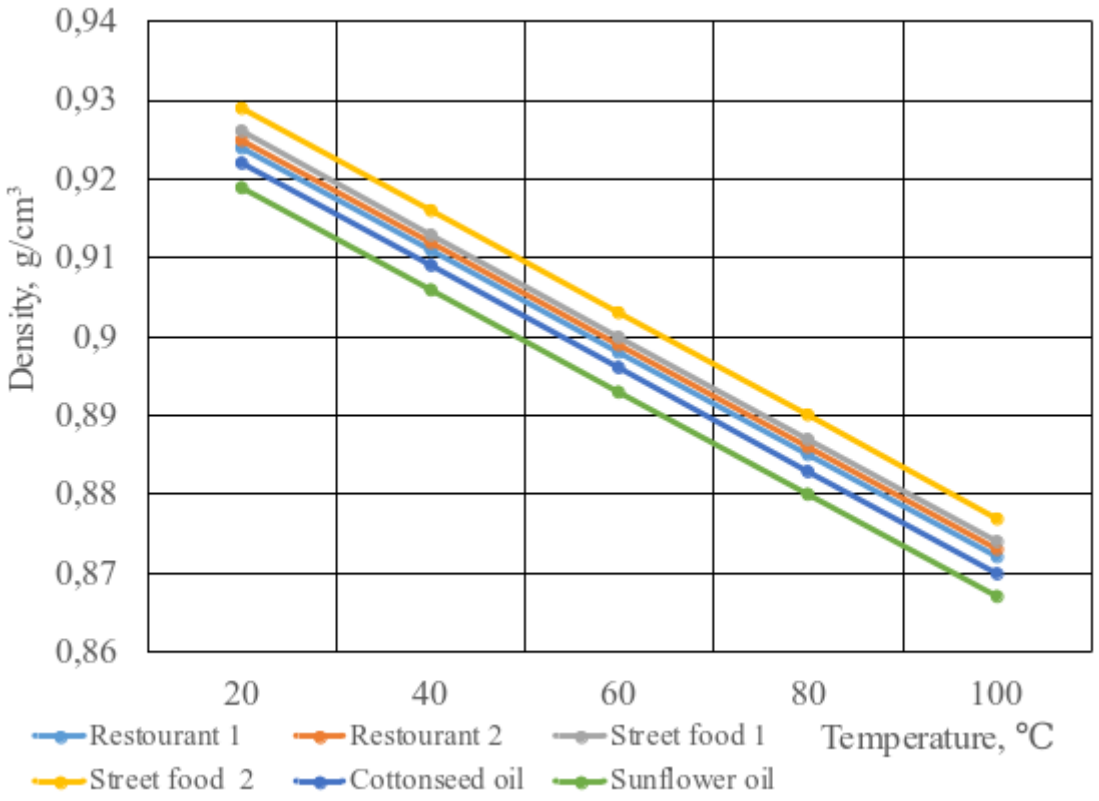


Figure 2. Density of waste cooking oils at different temperatures (g/cm³)

The data in Figure 2 indicate that the density of the waste cooking oils (much like their viscosity indices) was higher than that of the fresh oils. Oil density decreased as the temperature rose. Across all temperature readings, the highest density values were recorded for the «Street Food 2» sample; its density was 0.929 g/cm³ at 20°C and decreased to 0.877 g/cm³ at 100°C. Conversely, the lowest density values were observed in the fresh sunflower oil; its density was 0.919 g/cm³ at 20°C and 0.867 g/cm³ at 100°C.

The application of fats and oils depends on their fatty acid composition. Oils used for frying are rich in saturated fatty acids, whereas those used in liquid products or for purposes other than frying are rich in unsaturated fatty acids. This is directly related to the oxidative stability of the fatty acids; unsaturated fatty acids oxidize more rapidly during high-temperature processing. This process leads to the formation of oxidation products and an increase in peroxide and anisidine values. Therefore, the fatty acid composition of the oils used in subsequent experiments was analyzed. The results are presented in Table 2.

Table 2. Fatty acid composition of waste cooking oils

Fatty acids	Chemical symbol	Content, %			
		restaurant 1	restaurant 2	street food 1	street food 2
Lauric acid	(C12:0)	0	0	0	0,2 ± 0,01
Myristic acid	(C14:0)	0,129 ± 0,003	1,603 ± 0,006	0	1,073 ± 0,055
Palmitic acid	(C16:0)	8,8 ± 0,01	15,317 ± 0,006	9,019 ± 0,001	23,393 ± 0,012
Palmitic acid	(C16:1)	0	8,35 ± 0,01	0	0,8 ± 0,01
Stearic acid	(C18:0)	4,205 ± 0,013	3,085 ± 0,004	5,013 ± 0,006	3,497 ± 0,015
Oleic acid	(C18:1)	43,157 ± 0,006	28,910 ± 0,010	20,727 ± 0,006	20,801 ± 0,011

Fatty acids	Chemical symbol	Content, %			
		restaurant 1	restaurant 2	street food 1	street food 2
Elaidic acid	(C18:1) trans	2,103 ± 0,006	1,717 ± 0,029	2,397 ± 0,015	4,502 ± 0,008
Linoleic acid	(C18:2)	39,74 ± 0,01	24,813 ± 0,006	57,377 ± 0,006	50,398 ± 0,008
Linolenic acid	(C18:3)	0,2 ± 0,01	1,32 ± 0,01	0	0,01 ± 0,01
Arachidic acid	(C20:0)	0,43 ± 0,001	3,98 ± 0,027	0	0,2 ± 0,011
Gadolinic acid	(C20:1)	0	1,82 ± 0,002	0	0,1 ± 0,01
Benzene acid	(C22:0)	0,748 ± 0,008	1,203 ± 0,006	0	0
Erucic acid	(C22:1)	0,3 ± 0,005	0	0	0
Lingoseric acid	(C24:0)	0,3 ± 0,01	0	0	0

Table 2 shows the various fatty acids identified in the waste cooking oils. Lauric and gadoleic acids were not detected. Oleic, linoleic, palmitic, and stearic acids were found in the highest concentrations. The presence of small amounts of erucic acid indicates the inclusion of rapeseed oil; high levels of palmitic and linoleic acids point to the presence of cottonseed oil; and high levels of oleic acid indicate the presence of sunflower oil (this assumption is justified because the main vegetable oils used in Uzbekistan are cottonseed, sunflower, and rapeseed oils). Since the trans-fatty acid content in the street food waste exceeded the established 2 % limit [11, pp. 27], consumption is not recommended even after purification; therefore, it is advisable to use these oils for technical purposes.

During cooking, vegetable oils undergo complex physicochemical changes under the influence of high temperatures (160–190°C), oxygen in the air, and moisture in the product. In this case, part of the triglycerides is hydrolyzed to form free fatty acids, oxidized triglycerides as a result of oxidation, and high molecular weight compounds are formed during polymerization. As a result, the amount of total polar compounds in the oil increases. In international practice, the TPC indicator is one of the most important criteria for assessing the quality of the oil used. The chemical composition of the edible oils used in the research was determined and analyzed. The results obtained are presented in Table 3.

Table 3. Amount of total polar compounds in waste cooking oils

Indicator name	Content, %			
	restaurant 1	restaurant 2	street food 1	street food 2
Total polar compounds,% Including:	25,198 ± 0,003	25,80 ± 0,01	26,533 ± 0,058	31,502 ± 0,008
Triacylglycerol dimers	8,798 ± 0,003	8,916 ± 0,0563	8,790 ± 0,036	12,397 ± 0,006
Oxidized compounds	8,599 ± 0,002	8,803 ± 0,006	8,998 ± 0,003	9,199 ± 0,002
Diacylglycerols	5,586 ± 0,024	5,797 ± 0,015	6,063 ± 0,055	6,703 ± 0,006
Monoacylglycerols	0,503 ± 0,006	0,80 ± 0,01	0,802 ± 0,003	1,017 ± 0,029
Free fatty acids	1,700 ± 0,005	1,503 ± 0,006	1,803 ± 0,006	2,198 ± 0,004

The data in Table 3 show that the total polar compounds content in the studied waste cooking oil samples varied in the range of 25,2–31,5 %. The lowest value was recorded in the Restaurant 1 sample (25,2 %), which indicates that this oil has undergone relatively few chemical changes. The highest value was observed in the Street Food 2 sample (31,5 %). This value is higher than the

internationally accepted norm of 24–27 % for the content of total polar compounds, indicating that this oil has been heated many times and its use for food purposes should be limited. Values in this range were also observed in the Restaurant 2 (25,8 %) and Street Food 2 (26,5 %) samples.

Conclusion

Research results indicated that the physical and chemical properties of waste cooking oils in food service establishments in Tashkent differed from those of the original oils. Samples obtained from street food vendors showed higher acid values, peroxide values, moisture content, and color intensity. Increased heating temperatures resulted in reduced oil viscosity and density. Variations in fatty acid composition revealed that the oils originated from diverse sources. A comprehensive assessment of quality parameters is essential before any subsequent use of waste cooking oils. Reusing them for food purposes requires specific testing to ensure compliance with safety standards, whereas technical processing represents a promising avenue for utilization.

References

1. Manzoor S., Masoodi F.A., Rashid R., Ahmad M., Kousar M.U. Quality Assessment and Degradative Changes of Deep-Fried Oils in Street Fried Food Chain of Kashmir, India // Food Control. – 2022. – Vol. 141. – Art. 109184. – DOI: 10.1016/j.foodcont.2022.109184.
2. Meenu M., Decker E.A., Xu B. Application of Vibrational Spectroscopic Techniques for Determination of Thermal Degradation of Frying Oils and Fats: A Review // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. – 2022. – Vol. 62, No. 21. – P. 5744–5765. – DOI: 10.1080/10408398.2021.1891520.
3. Erickson M.D., Yevtushenko D.P., Lu Z.-X. Oxidation and Thermal Degradation of Oil during Frying: A Review of Natural Antioxidant Use // Food Reviews International. – 2023. – Vol. 39, No. 7. – P. 4665–4696. – DOI: 10.1080/87559129.2022.2039689.
4. Azzena U., Montenero A., Carraro M., Crisafulli R., De Luca L., Gaspa S., Muzzu A., Nuvoli L., Polese R., Pisano L., Pintus E., Pintus S., Girella A., Milanese C. et al. Recovery, Purification, Analysis and Chemical Modification of a Waste Cooking Oil // Waste and Biomass Valorization. – 2023. – Vol. 14. – P. 145–157. – DOI: 10.1007/s12649-022-01845-3.
5. Foo W.H., Koay S.S.N., Chia S.R., Chia W.Y., Tang D.Y.Y., Nomanbhay S., Chew K.W. Recent Advances in the Conversion of Waste Cooking Oil into Value-Added Products: A Review // Fuel. – 2022. – Vol. 324. – Art. 124539. – DOI: 10.1016/j.fuel.2022.124539.
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. Abrante-Pascual S., Nieva-Echevarría B., Goicoechea-Oses E. Vegetable Oils and Their Use for Frying: A Review of Their Compositional Differences and Degradation // Foods. – 2024. – Vol. 13, No. 24. – Art. 4186. – DOI: 10.3390/foods13244186.
8. Nazeri Nur, Hasan Nurunafisah, Amran Fadina, Ahmad Zaini. Muhammad Abbas. Repurposing waste cooking oil: A mini review // Environmental Progress & Sustainable Energy. – 2026. – P. 1–15. – DOI: 10.1002/ep.70707.

9. Ahadito Bijak Riyandi, Afriani Siti. Soap Production from Waste Cooking Oil: A Review // Indonesian Journal of Fundamental and Applied Chemistry. – 2024. – Vol. 9, No. 2. – P. 96–102. – DOI: 10.24845/ijfac.v9.i2.96.
10. Panadare D.C., Rathod V.K. Applications of Waste Cooking Oil Other Than Biodiesel: A Review // Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering. – 2015. – Vol. 12, No. 3. – P. 55–76.
11. Technical Regulation of the Customs Union «Technical Regulation on Oil and Fat Products» (TR CU 024/2011): approved by the Decision of the Customs Union Commission dated December 9, 2011 [Электронный ресурс]. – No. 883. – URL: https://meganorm.ru/Data2/1/4293799/4293799294.pdf.

Received: 09.10.2026
Accepted: 15.10.2026
Published: 28.10.2026

УДК 664.66+615.32

Evaluation of the osteoprotective potential of field horsetail and stinging nettle as potential additives in the production of functional bread

Shokirov Komil Akmalovich
Doctoral candidate, Bukhara State Technical University
Uzbekistan, Bukhara
E-mail: komil.wp@gmail.com

Оценка остеопротективного потенциала хвоща полевого и крапивы двудомной как потенциальных добавок в производстве хлеба функционального назначения

Шокиров Комил Акмалович
докторант
Бухарский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Бухара

Abstract

The search for accessible plant sources of minerals and vitamins involved in bone formation is relevant to the development of functional bread aimed at preventing osteoporosis. The aim of the study was to assess the quality indicators and osteoprotective potential of field horsetail (*Equisetum arvense*) and stinging nettle (*Urtica dioica*) powders as additives in bread production. The aerial part of horsetail and nettle leaves were dried, crushed and freeze-dried; the organoleptic, physicochemical, structural-mechanical and sanitary-hygienic indicators of the powders were determined, the content of nutrients significant for bone tissue was analysed, and the expected technological, functional and physiological effects of using the powders in breadmaking were systematised on the basis of published data. The moisture content of the powders was 5.0 ± 0.5 % for horsetail and 6.5 ± 0.5 % for nettle, the ash content was 5.1 ± 0.3 % and 4.2 ± 0.3 %, and the water absorption capacity was 20.0 ± 1.4 % and 22.2 ± 1.3 %, respectively; in terms of sanitary-hygienic indicators, the raw materials complied with the requirements of Technical Regulation TR CU 021/2011. Nettle is a source of calcium (481 mg/100 g), magnesium (57 mg/100 g) and vitamins C and K, while horsetail is a source of silicon (70 mg/100 g). Nettle powder had more

Библиографическое описание: Шокиров К.А. Оценка остеопротективного потенциала хвоща полевого и крапивы двудомной как потенциальных добавок в производстве хлеба функционального назначения // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23564

For citation: Shokirov K.A. Evaluation of the osteoprotective potential of field horsetail and stinging nettle as potential additives in the production of functional bread // Universum: Technical Sciences : electronic scientific journal. 2026. No. 10(151). Available at: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23564

attractive organoleptic properties and better flowability. The combination of silicon, calcium, vitamin K and antioxidant compounds justifies the combined use of the studied plants. The results can be used in developing formulations of bakery products for osteoporosis prevention.

Аннотация

Поиск доступных растительных источников минеральных веществ и витаминов, участвующих в формировании костной ткани, актуален для разработки хлеба функционального назначения, направленного на профилактику остеопороза. Цель исследования — оценить показатели качества и остеопротективный потенциал порошков хвоща полевого (*Equisetum arvense*) и крапивы двудомной (*Urtica dioica*) как добавок в производстве хлеба. Надземную часть хвоща и листья крапивы высушивали, измельчали и подвергали сублимационной сушке; в полученных порошках определяли органолептические, физико-химические, структурно-механические и санитарно-гигиенические показатели, анализировали содержание нутриентов, значимых для костной ткани, а ожидаемые технологические, функциональные и физиологические эффекты применения порошков в хлебопечении систематизировали на основе литературных данных. Влажность порошков составила 5,0 ± 0,5 % для хвоща и 6,5 ± 0,5 % для крапивы, зольность — 5,1 ± 0,3 и 4,2 ± 0,3 %, водопоглотительная способность — 20,0 ± 1,4 и 22,2 ± 1,3 % соответственно; по санитарно-гигиеническим показателям сырьё соответствовало требованиям технического регламента Таможенного союза ТР ТС 021/2011. Крапива является источником кальция (481 мг/100 г), магния (57 мг/100 г), витаминов С и К, а хвощ — кремния (70 мг/100 г). Порошок крапивы отличался более привлекательными органолептическими свойствами и лучшей сыпучестью. Сочетание кремния, кальция, витамина К и антиоксидантных соединений обосновывает совместное применение исследованных растений. Полученные результаты могут быть использованы при разработке рецептур хлебобулочных изделий для профилактики остеопороза.

Keywords: functional foods, osteoporosis, bakery products, field horsetail, stinging nettle, silicon, calcium.

Ключевые слова: функциональные продукты, остеопороз, хлебобулочные изделия, хвощ полевой, крапива двудомная, кремний, кальций.

Introduction

Medicinal plants are considered a promising source of biologically active substances with a broad spectrum of physiological effects, including osteoprotective properties. Field horsetail (*Equisetum arvense*) and stinging nettle (*Urtica dioica*) are of particular scientific interest, traditionally used in folk and traditional medicine for mineral metabolism disorders and diseases of the musculoskeletal system.

In modern conditions, a priority area of food science is the creation of functional products capable of exerting targeted physiological effects on the body. One technologically and economically feasible approach is the enrichment of bakery products with plant-based ingredients

containing minerals and vitamins involved in the formation and maintenance of bone tissue [2; 4; 5; 9]. Of particular interest is their combined use, which provides a synergistic effect due to the combination of silicon, calcium, vitamins, and antioxidant compounds.

The purpose of the research is to study the properties of field horsetail and stinging nettle powders and assess their potential as functional ingredients in the development of targeted bakery products. To achieve this purpose, the following tasks were set: to evaluate the organoleptic, physicochemical and structural-mechanical properties of the powders; to analyse their content of nutrients significant for bone tissue; and to systematise the expected technological, functional and physiological effects of their use in bread production.

Materials and Methods

The objects of the research were:

- field horsetail (aerial part, June–July);
- stinging nettle (leaves, May–June).

The raw materials were dried to a moisture content of 10.0–12.0 %, then crushed and freeze-dried. Freeze-drying was carried out according to standard protocols in order to preserve the maximum amount of biologically active substances and achieve high flowability of the raw materials. The resulting powders were sieved through a 0.2 mm sieve.

Quality assessment was conducted based on the following parameters: organoleptic; physicochemical; structural and mechanical; chemical composition; and sanitary and hygienic parameters, the latter in accordance with the requirements of TR CU 021/2011 [11].

The research methods complied with current regulatory documents.

Results and Discussion

Medicinal plants, due to their rich biochemical composition, represent a promising source of biologically active substances with a broad spectrum of pharmacological activity, including osteoprotective action. Horsetail and stinging nettle are widely known and readily available medicinal plants, traditionally used in folk medicine to treat various ailments, including those associated with mineral metabolism disorders [3; 8]. Including extracts or powders of medicinal plants in bread recipes can be an effective way to enhance its therapeutic and prophylactic value.

Field horsetail (*Equisetum arvense*) is a perennial spore-bearing plant common in temperate climates. Its medicinal properties are due to a complex of biologically active compounds (Figure 1, a).

Stinging nettle (*Urtica dioica*) is a common herbaceous plant known for its numerous medicinal properties, including its use in the treatment of arthrosis, arthritis, and gout in folk and traditional medicine (Figure 1, b).



a)



b)

Figure 1. Appearance of field horsetail (a) and stinging nettle (b)

An analysis of the quality indicators of the studied supplements (Table 1) revealed that both powders had a characteristic color, odor, and taste with no signs of spoilage. However, horsetail powder had a duller color and a neutral taste, while stinging nettle retained a green color and a distinct herbaceous aroma. Based on organoleptic characteristics, stinging nettle appears more “food-grade” and appealing to consumers.

Table 1. Quality indicators of horsetail and stinging nettle powders

Indicator	**Powder quality values**	
	horsetail	***nettle***
Organoleptic properties		
Appearance	Homogeneous fine powder, free of foreign impurities	
Color	Gray-green or greenish-brown	Green (light to dark green)
Odor	Faint, herbaceous, characteristic	Herbaceous, fresh, characteristic
Taste	Neutral, slightly astringent	Herbaceous, slightly tart
Physicochemical properties		
Moisture content, %, no more than 12.0	5.0 ± 0.5	6.5 ± 0.5
Total ash content, %	5.1 ± 0.3	4.2 ± 0.3
Active acidity, pH	6.2 ± 0.3	6.8 ± 0.2
Solubility	Average, poorly wetted	Good
Structural and mechanical properties		
Dispersity, mm	0.3 ± 0.2	0.3 ± 0.2
Bulk density, g/cm³	0.62 ± 0.1	0.47 ± 0.1
Water absorption capacity, %	20.0 ± 1.4	22.2 ± 1.3
Flowability	Average	Good
Caking	Does not cake at normal humidity	

The moisture content of the samples does not exceed standard values (≤12.0 %). Horsetail ash content reaches 20.0 %, due to its high mineral content, primarily silicon. The finely dispersed structure (0.1–0.5 mm) ensures high bioavailability and technological suitability of the powders.

An analysis of the biochemical composition and osteoprotective potential of the studied raw materials revealed that horsetail is a rich source of silicon, while stinging nettle contains calcium, magnesium, and vitamins C and K (Table 2).

Table 2. Pharmacologically active substances and compounds in medicinal herbs that are significant for osteoporosis

Nutrients	**Value in 100 g / range**	
	horsetail	***nettle***
Silicon, mg	70	10
Calcium, mg	15	481
Iron, mg	0.5	2.7
Magnesium, mg	20	57
Phosphorus, mg	190	270
Vitamin C, mg	0	93
Vitamin K, mcg	0	481
Phytochemicals	Flavonoids (quercetin, kaempferol), terpenes (α-pinene, limonene), essential oils	Phenolic acids (caffeic acid), chlorophyll, bioflavonoids

A description of the essential and distinguishing features (definitions) of these herbal preparations is presented in Table 3.

Table 3. Definitions of the active components of raw materials for osteoporosis prevention

Active component	**Definitions of the active component**
Field horsetail	
Silicon	Has anti-inflammatory properties. Plays an important role in bone metabolism, participating in collagen synthesis and bone mineralization, and accelerates bone recovery after fractures [1, p. 99–110]
Phenols	Low-molecular compounds that have antioxidant activity and help protect cells from oxidative stress [10]
Stinging nettle	
Chlorophyll	A pigment that supports cellular health and has antioxidant properties, promoting detoxification
Calcium	An essential mineral necessary for the formation and maintenance of strong bones. A calcium deficiency can lead to osteoporosis
Vitamin K	Promotes bone mineralization and improves absorption

Based on the presented data (Tables 2, 3), it was established that stinging nettle has a more pronounced potential for replenishing the deficiency of key minerals and vitamins necessary for the prevention of osteoporosis. Of greatest importance is the high content of calcium and vitamin K, which play a fundamental role in the formation, mineralization, and maintenance of bone strength.

Calcium is the main structural component of bones [10], while vitamin K is involved in the regulation of bone metabolism and a reduction in the risk of fractures by activating the synthesis of proteins that ensure mineralization [12].

Additionally, stinging nettle contains flavonoids, phenolic acids, sterols, and chlorophyll, which possess antioxidant and anti-inflammatory activity and thus have a positive effect on bone tissue [8; 10].

Field horsetail, in turn, is characterized by a high content of bioavailable silicon [6; 7] and can be considered an effective source of this micronutrient, essential for the formation and strengthening of bone matrix.

Combined use of these plants provides a comprehensive effect:

- silicon improves calcium absorption;
- calcium and vitamin K enhance bone mineralization;
- antioxidants reduce oxidative stress.

Thus, a synergistic effect is achieved, increasing the effectiveness of osteoporosis prevention.

Next, a structured review of the use of horsetail and nettle powders in bread production was conducted, with an emphasis on osteoporosis prevention, in three areas: technological effect (impact on the baking process and product properties), functional characteristics (enrichment with nutrients), and physiological activity (Table 4).

The review showed that field horsetail improves bread porosity and volume, increases the gas-retaining capacity of the dough and enriches the product with silicon; stinging nettle increases nutritional value, improves color and aroma and stabilizes the dough structure; a mixture of the plants provides a comprehensive improvement in the structure and quality of bread, increases the functional value of the product and forms attractive organoleptic properties (Table 4).

Table 4. Expected technological effect of using horsetail and nettle powders in bread production for osteoporosis prevention

Technological effect	**Functional characteristics**	**Physiological activity of food ingredients**
Field horsetail		
Increases bread porosity and volume	Enriches the product with minerals (silicon)	Improves metabolism, supports joint and skin health
Improves texture	Improves consistency	Has a diuretic effect, cleanses the body of toxins
Relevance for osteoporosis	***High***	
Stinging nettle		
Increases nutritional value	Enriches with vitamins and minerals (iron, calcium)	Anti-inflammatory properties
Improves color and aroma	Promotes improved taste	Normalizes blood sugar levels
Relevance for osteoporosis	***High***	
A mixture of field horsetail and stinging nettle		
Increases bread porosity and volume	Enriches the product with minerals (silicon, iron) and vitamins (C, K)	Improves metabolism and supports joint and skin health
Improves dough texture and elasticity	Improves consistency and taste	Anti-inflammatory properties, normalizes blood sugar level

Technological effect	Functional characteristics	Physiological activity of food ingredients
Improves color and aroma	Gives the product a natural greenish tint and a pleasant herbal aroma	Diuretic properties, detoxifies the body
Relevance for osteoporosis	***Maximum***	

Powders from the studied medicinal plants transform ordinary bread into a functional product for the prevention of osteoporosis, combining technological improvements (better texture, taste) with nutritional value. The mixture is most effective, providing a balance of silicon (for bone formation) and calcium (for density), which is confirmed by studies on the role of nutrients and plant compounds in osteoporosis prevention [1; 10; 12].

Conclusion

Field horsetail and stinging nettle powders have been found to possess high quality and meet safety requirements. Nettle is a source of calcium and vitamins, while horsetail is a source of silicon, which determines their osteoprotective potential. The combined use of these plants provides a pronounced synergistic effect. Adding these powders to bread recipes improves its technological and functional properties. Developing bakery products using these components is a promising direction in the development of preventative products.

References

1. Jugdaohsingh R. Silicon and bone health // The Journal of Nutrition, Health & Aging. – 2007. – Vol. 11, No. 2. – P. 99–110.
2. Kim H.-Y. The quality characteristics of Sulgidduk made with Equisetum arvense powder // The Korean Journal of Community Living Science. – 2020. – Vol. 31, No. 4. – P. 575–583. – DOI: 10.7856/kjcls.2020.31.4.575.
3. Luanda A., Ripanda A., Makangara J.J. Therapeutic potential of Equisetum arvense L. for management of medical conditions // Phytomedicine Plus. – 2023. – Vol. 3, No. 2. – Art. 100444.
4. Rădulescu L., Tarkanyi P., Velciov A.B. [et al.]. Nettle bread, a potential functional product / L. Rădulescu, P. Tarkanyi, A.B. Velciov [et al.] // Scientific Papers. Series A. Agronomy. – 2024. – Vol. 67, No. 2. – P. 591–595.
5. A. Maietti, P. Tedeschi, M. Catani [et al.]. Nutrient composition and antioxidant performances of bread-making products enriched with stinging nettle (Urtica dioica) leaves // Foods. – 2021. – Vol. 10, No. 5. – Art. 938. – DOI: 10.3390/foods10050938.
6. N. Boqué, R.M. Valls, A. Pedret [et al.]. Relative absorption of silicon from different formulations of dietary supplements: a pilot randomized, double-blind, crossover post-prandial study // Scientific Reports. – 2021. – Vol. 11. – Art. 16479. – DOI: 10.1038/s41598-021-95220-2.
7. A. Waterstradt, M. Winker, A.M. Zimmermann-Klemd [et al.]. Silicon resorption from Equisetum arvense tea: a randomized, three-armed pilot study // Planta Medica. – 2022. – Vol. 88, No. 14. – P. 1360–1368. – DOI: 10.1055/a-1643-5493.

8. H.P. Devkota, K.R. Paudel, S. Khanal [et al.]. Stinging nettle (Urtica dioica L.): nutritional composition, bioactive compounds, and food functional properties // Molecules. – 2022. – Vol. 27, No. 16. – Art. 5219. – DOI: 10.3390/molecules27165219.
9. Đurović S., Vujanović M., Radojković M. [et al.]. The functional food production: application of stinging nettle leaves and its extracts in the baking of a bread / S. Đurović, M. Vujanović, M. Radojković [et al.] // Food Chemistry. – 2020. – Vol. 312. – Art. 126091. – DOI: 10.1016/j.foodchem.2019.126091.
10. M. Martiniakova, M. Babikova, V. Mondockova [et al.]. The role of macronutrients, micronutrients and flavonoid polyphenols in the prevention and treatment of osteoporosis // Nutrients. – 2022. – Vol. 14, No. 3. – Art. 523. – DOI: 10.3390/nu14030523.
11. TR TS 021/2011. O bezopasnosti pishchevoy produktsii [On food safety]: tekhnicheskiy reglament Tamozhennogo soyuza: utv. Resheniyem Komissii Tamozhennogo soyuza ot 09.12.2011 № 880. (In Russ.).
12. M. Fusaro, G. Cianciolo, M.L. Brandi [et al.]. Vitamin K and osteoporosis // Nutrients. – 2020. – Vol. 12, No. 12. – Art. 3625. – DOI: 10.3390/nu12123625.

Received: 20.09.2026
Accepted: 26.09.2026
Published: 28.10.2026

УДК 664.8.047

Analysis of different apricot varieties grown in Uzbekistan to improve the production of salted kernels

Yamaletdinova Munira Faditovna
candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Bukhara State Technical University Associate Professor of the Department of Mechanical engineering and technological equipment
Uzbekistan, Bukhara
E-mail: Munira-Ruslan77-79@mail.ru

Анализ различных сортов абрикоса, выращиваемых в Узбекистане, для совершенствования производства соленых косточек

Ямалетдинова Мунира Фадитовна
канд. техн. наук, доц., доц. кафедры Машиностроение и технологическое оборудование, Бухарский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Бухара

Abstract

The objective of this study was to evaluate the physical, structural, and hydration properties of nine apricot varieties grown in the Bukhara region of Uzbekistan — “Sinchalak”, “Kandak”, “Ak Navat”, “Shirin Djaupazak”, “Childona”, “Bodomcha”, “Kandak Krasny”, “Maisky”, and “Javzak” — and to develop, on this basis, an energy-efficient mechanized method for producing salted kernels (shurdanak) from apricot processing waste. For each variety, 100 pits were measured for length, width, shell thickness, joint width and mass using a digital caliper (±0.01 mm) and an analytical balance (±0.001 g); water-absorption kinetics were determined gravimetrically at 55±1°C in a 25–30 % saline solution over 0.5–4.0 minutes for intact and pre-cracked pits, and mechanical fracture resistance was measured with a digital force gauge; each experiment was replicated three times and evaluated by one-way ANOVA with Tukey’s post-hoc test ($p<0.05$). Shell thickness ranged from 0.72±0.04 mm (‘Childona’) to 1.24±0.08 mm (‘Ak Navat’), with corresponding minimum fracture forces of 145±12 N and 385±22 N. Pre-cracking increased the brine-absorption rate up to 2.8-fold relative to intact pits: ‘Childona’ reached 34.8±2.2 % moisture uptake within 2.0 minutes of soaking. The proposed continuous sequence — calibration, mechanical pre-cracking,

Библиографическое описание: Ямалетдинова М.Ф. Анализ различных сортов абрикоса, выращиваемых в Узбекистане, для совершенствования производства соленых косточек // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23514

For citation: Yamaletdinova M.F. Analysis of different apricot varieties grown in Uzbekistan to improve the production of salted kernels // Universum: Technical Sciences : electronic scientific journal. 2026. No. 10(151). Available at: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23514

controlled saline soaking, thermal stabilization, and roasting — raised throughput from 7.5±2.5 to 75.0±5.0 kg/h, reduced specific electrical energy consumption by 32.5 % (12.0 to 8.1 kWh/t) and thermal energy consumption by 28.0 % (4.82 to 3.47 MJ/kg), while lowering the kernel defect rate from 14.5±1.8 % to 2.1±0.3 % and improving salinity uniformity (RSD from 24.1 % to 3.8 %).

Аннотация

Целью настоящего исследования являлась оценка физических, структурных и гидратационных свойств девяти сортов абрикоса, выращиваемых в Бухарской области Узбекистана — «Синчалак», «Кандак», «Ак Нават», «Ширин Джаупазак», «Чилдона», «Бодомча», «Кандак Красный», «Майский» и «Жавзак», — а также разработка на этой основе энергоэффективного механизированного метода производства соленых косточек (шурданак) из отходов переработки абрикосов. Для каждого сорта у 100 косточек с помощью цифрового штангенциркуля (±0,01 мм) и аналитических весов (±0,001 г) измеряли длину, ширину, толщину скорлупы, ширину стыка и массу; кинетику влагопоглощения определяли гравиметрически при 55±1°C в 25–30 % солевом растворе в течение 0,5–4,0 минут для целых и предварительно надколотых косточек, механическую прочность на разрушение измеряли цифровым динамометром; каждый опыт повторяли трижды с последующей обработкой методом однофакторного дисперсионного анализа с post-hoc тестом Тьюки ($p<0,05$). Толщина скорлупы варьировала от 0,72±0,04 мм («Чилдона») до 1,24±0,08 мм («Ак Нават»), при соответствующих минимальных усилиях разрушения 145±12 Н и 385±22 Н. Предварительное раскалывание повышало скорость влагопоглощения до 2,8 раза по сравнению с целыми косточками: сорт «Чилдона» достигал влагопоглощения 34,8±2,2 % за 2,0 минуты замачивания. Предложенная непрерывная последовательность — калибровка, механическое предварительное раскалывание, контролируемое засаливание, термическая стабилизация и обжаривание — повысила производительность с 7,5±2,5 до 75,0±5,0 кг/ч, снизила удельное потребление электроэнергии на 32,5 % (с 12,0 до 8,1 кВт·ч/т) и удельное потребление тепловой энергии на 28,0 % (с 4,82 до 3,47 МДж/кг), при этом доля дефектных ядер снизилась с 14,5±1,8 % до 2,1±0,3 %, а равномерность засолки (коэффициент вариации) улучшилась с 24,1 % до 3,8 %.

Keywords: processing, pit of apricot, salted kernels, the mechanization process, the formation of cracks, shells, bone, research, waste, water absorption, grade.

Ключевые слова: переработка, косточка абрикоса, соленые косточки, механизация процесса, образование трещины, скорлупа косточки, исследования, отходы, влагопоглощение, сорт.

Introduction

In the East, where the apricot has long been known for its healing properties, apricot kernels were harvested in large quantities, dried and prepared similarly to other nuts (almonds, walnuts, etc.). An apricot kernel is a woody, shell-covered core found within the pulp of the apricot. Kernels are primarily used as seeds for plant propagation.

Apricot kernels contain a large amount of fatty acids, several mineral compounds, organic acids, and a number of both essential and replaceable amino acids [5, p. 366]. The presence of various fatty acids determines the energy value of the product. Organic acids and minerals have a positive effect on the functioning of internal organs and metabolism.

In Central Asia, more specifically in the ancient city of Bukhara, known as the «Pearl of the East,» an ancient recipe for making traditional salted pits – shurdanak - has been preserved since ancient times. The traditional preparation method involves mechanically cracking the shells (by striking each pit with a hammer) to create cracks, soaking them in a brine solution for 1 to 4 minutes at a temperature of 50 to 60°C, and then roasting them in a cauldron. However, this artisanal method is labor-intensive, has low productivity, and lacks quality control [10].

The relevance of this study is determined by the need to process apricot fruit waste (pits) and to mechanize the artisanal production of the national product «salted kernels.» The aim of this study is to establish, through comparative analysis of the physical, structural and hydration properties of nine apricot varieties, an optimal, energy-efficient method for preparing salted pits by mechanizing the shell-cracking process and intensifying the subsequent heat- and mass-exchange stages of soaking, thermal treatment and frying [1, p. 174-175]. To achieve this aim, the following tasks were set: (1) to measure and compare the geometric, mass and mechanical fracture characteristics of pits from nine varieties; (2) to determine the water-absorption kinetics of intact and pre-cracked pits under controlled saline-soaking conditions; and (3) to develop, on this basis, a mechanized processing sequence and to quantify its productivity, defect-rate and energy benefits relative to the traditional artisanal method.

Unlike existing artisanal methods, our proposed method combines calibrated cracking, controlled saline soaking, and thermal treatment in a single integrated sequence, allowing for process intensification and reduced energy consumption.

Research Methods and Methodologies

Sampling and Varietal Classification: We examined nine different apricot varieties and their kernels, grown in the Bukhara region of Uzbekistan: “Sinchalak”, “Kandak”, “Ak Navat”, “Shirin Djaupazak”, “Maisky”, “Childona”, “Kandak Krasny” and “Bodomcha”. All samples were harvested at commercial maturity (June–July 2025).

Geometric and Mass Parameters Measurement: For each variety, 100 randomly selected pits were measured using a digital caliper (Absolute Digimatic model, precision ±0.01 mm) and weighed on an electronic analytical balance (OHAUS Pioneer model, precision ±0.001 g). The following parameters were recorded: maximum pit length (mm), maximum pit width (mm), shell wall thickness (mm) — measured at three points per pit, shell joint width (mm), and the weight of individual pit (g). All measurements were taken by the same operator to minimize inter-observer variability.

Hydration Kinetics Determination: Water absorption by apricot kernels was studied at 55±1°C in a 25–30 % saline solution. A thermostatically controlled water bath (model TW-2, precision ±0.1°C) was used to maintain the solution temperature. Samples were first dried to a constant initial moisture content (6.5±0.2 %), then both intact and mechanically pre-cracked pits were immersed in

the saline solution for periods of 0.5 to 4.0 minutes; after extraction, surface moisture was removed by vacuum filtration blotting and samples were re-weighed. Water absorption (W, %) was calculated as:

$$W = \frac{m_w - m_d}{m_d} \times 100\%$$

where m_w = mass after soaking, m_d = dry mass. Each experiment was replicated three times.

Mechanical Cracking and Thermal Processing Line: Mechanical fracture resistance was measured using a laboratory compression tester fitted with a digital force gauge (up to 1 kN, precision ±1 N). The pre-cracking step was performed using a dual-roller mechanical cracker with adjustable clearance, applying a controlled, reproducible force along the suture line of each pit. Energy consumption during thermal treatment and roasting was recorded with calibrated multi-function energy meters connected to the experimental processing line. The integrated sequence consists of:

1. Calibrating pits according to maximum and minimum sizes;
2. Pre-cracking the shell using a mechanical cracker (controlled force application);
3. Moistening in 25–30 % saline solution at 50–60°C for 1.5–2 minutes;
4. Thermal stabilization at 105–110°C for 1.5–2 minutes to expand internal vapor pockets and lock the structural cracks;
5. Continuous roasting at 140–150°C for 2–3 minutes.

Statistical Analysis: Data are presented as mean ± standard deviation. Comparisons between varieties were made using one-way ANOVA with Tukey's post-hoc test ($p < 0.05$) in SPSS software to determine statistically significant differences.

Results and Discussion

Table 1. Summarizes the dimensional and mass parameters of the nine studied varieties (mean ± SD, n = 100 pits per variety)

Variety	Length (mm)	Width (mm)	Shell thickness (mm)	Joint width (mm)	Weight (g)
Sinchalak	19.1 ± 0.5	18.0 ± 0.4	0.81 ± 0.05	4.0 ± 0.3	1.2–1.7
Kandak	20.2 ± 0.6	14.1 ± 0.5	1.02 ± 0.07	3.0 ± 0.2	1.0–1.2
Ak Navat	19.4 ± 0.4	15.2 ± 0.4	1.24 ± 0.08	5.0 ± 0.4	0.9–1.2
Shirin Djaupazak	21.0 ± 0.7	14.3 ± 0.5	1.05 ± 0.06	4.0 ± 0.3	1.0–1.3
Childona	15.3 ± 0.4	13.2 ± 0.4	0.72 ± 0.04	3.0 ± 0.2	0.7–0.9
Bodomcha	20.1 ± 0.5	28.2 ± 0.6	0.84 ± 0.05	5.0 ± 0.4	1.1–1.5
Kandak Krasny	20.3 ± 0.6	17.1 ± 0.5	1.01 ± 0.06	4.0 ± 0.3	1.0–1.2
Maisky	20.2 ± 0.5	18.1 ± 0.4	0.98 ± 0.05	4.0 ± 0.3	0.4–0.8
Javzak	20.4 ± 0.6	15.3 ± 0.5	1.03 ± 0.07	4.0 ± 0.3	0.9–1.4

As shown in Table 1, the nine varieties differ markedly in both size and shell structure ($p < 0.05$). The "Childona" variety exhibited the smallest shell thickness (0.72±0.04 mm) and lowest mass range (0.7–0.9 g), and required the lowest fracture force (Fcr = 145±12 N) to produce a stable, non-destructive crack along the suture. Conversely, 'Ak Navat' had the thickest shell (1.24±0.08

mm) and the highest fracture threshold (Fcr = 385±22 N), while ‘Bodomcha’ combined a wide joint (5.0±0.4 mm) with the largest width (28.2±0.6 mm). These results establish that individual sorting and size calibration by variety are necessary before mechanical cracking, to avoid core crushing in thin-shelled varieties and incomplete cracking in thick-shelled ones.

The penetration of brine solution into the kernel cavity depends strongly on whether the shell is intact or pre-cracked, and on the width of the suture joint. Table 2 summarizes the hydration kinetics at 55°C for three representative varieties (Sinchalak, Childona, Ak Navat).

Table 2. Brine absorption kinetics (W, %) of intact versus pre-cracked apricot pits at 55°C

Soaking time (min)	Sinchalak (intact)	Childona (intact)	Ak Navat (intact)	Sinchalak (pre-cracked)	Childona (pre-cracked)	Ak Navat (pre-cracked)
0.5	2.1 ± 0.2	3.4 ± 0.3	1.5 ± 0.1	8.5 ± 0.6	12.4 ± 0.9	6.2 ± 0.4
1.0	4.5 ± 0.3	6.8 ± 0.5	3.1 ± 0.2	15.2 ± 1.1	22.1 ± 1.5	11.4 ± 0.8
1.5	7.2 ± 0.5	9.5 ± 0.7	5.0 ± 0.4	22.4 ± 1.6	31.2 ± 2.1	16.8 ± 1.2
2.0	9.8 ± 0.8	12.1 ± 0.9	6.8 ± 0.5	28.1 ± 1.9	34.8 ± 2.2	22.1 ± 1.5
3.0	14.2 ± 1.1	17.5 ± 1.2	9.9 ± 0.7	29.4 ± 2.0	35.2 ± 2.3	26.4 ± 1.8
4.0	18.1 ± 1.4	21.3 ± 1.5	12.5 ± 0.9	29.8 ± 2.1	35.4 ± 2.2	28.9 ± 2.0

A comparative operational assessment between the traditional artisanal method and the proposed mechanized continuous processing line was conducted to quantify system-level efficiencies; results are summarized in Table 3.

Table 3. Technical, economic and energy-efficiency comparison of production methods

Operational parameter	Artisanal method	Proposed mechanized method
Process continuity	Discontinuous	Continuous (automated)
Throughput (kg/hour)	7.5 ± 2.5	75.0 ± 5.0
Specific electrical energy demand (kWh/t)	12.0	8.1 (↓ 32.5%)
Specific thermal energy demand (MJ/kg)	4.82	3.47 (↓ 28.0%)
Kernel defect rate (%)	14.5 ± 1.8	2.1 ± 0.3
Product salinity uniformity (RSD, %)	24.1	3.8

As shown in Table 3, the mechanized sequence raises throughput roughly tenfold, from 7.5±2.5 to 75.0±5.0 kg per hour. Specific electrical energy demand falls by 32.5 % (from 12.0 to 8.1 kWh/t), reflecting the replacement of manual hammering with a single optimized cracking operation, while targeted heat transfer in the continuous thermal-stabilization and roasting stages reduces specific thermal energy demand by 28.0 % (from 4.82 to 3.47 MJ/kg) relative to open-cauldron heating. The kernel defect rate falls from 14.5±1.8 % to 2.1±0.3 %, and salinity-uniformity variation (RSD) falls from 24.1 % to 3.8 %, confirming that the proposed sequence not only saves energy and labor but also yields a more consistent, higher-quality product. The present results, obtained at laboratory and pilot-line scale, establish the varietal, hydration-kinetic and energy basis of the proposed sequence; remaining steps toward full industrial implementation include

mathematical modeling of coupled heat and mass transfer during thermal stabilization and roasting, long-term durability testing of the mechanical cracker under continuous operation, and sensory and shelf-life evaluation of the finished product.

Conclusion

We have identified the key physical, structural and hydration properties of nine apricot varieties grown in Uzbekistan: shell thickness ranging from 0.72±0.04 mm (‘Childona’) to 1.24±0.08 mm (‘Ak Navat’), corresponding fracture forces of 145±12 N to 385±22 N, and pre-cracked brine-absorption rates up to 2.8-fold higher than intact pits. The ‘Childona’ variety, combining the thinnest shell, lowest mass and lowest fracture force, is most suitable for mechanized salted-kernel production.

The proposed continuous method — calibration, mechanical pre-cracking, controlled saline soaking, thermal stabilization, and roasting — raises throughput from 7.5±2.5 to 75.0±5.0 kg per hour, reduces specific electrical energy consumption by 32.5 % and specific thermal energy consumption by 28.0 % relative to the traditional artisanal method, lowers the kernel defect rate from 14.5±1.8 % to 2.1±0.3 %, and improves salinity uniformity (RSD from 24.1 % to 3.8 %), providing a scientifically grounded basis for the industrial scale-up of shurdanak production from apricot processing waste.

Future research will focus on:

- Mathematical modeling of coupled heat and mass transfer during thermal stabilization and roasting
- Long-term durability and throughput testing of the mechanical cracker under continuous industrial operation
- Sensory evaluation and shelf-life assessment of the finished product

References

1. Artikov, A.A. Study of the temperature field in the kernel of oil-containing stone fruit crops / A.A. Artikov, A.F. Safarov, T.R. Shomurodov, K. Kh. Gafurov // Universities News. Food Technology. – 1991. – No. 1–3. – P. 174–175.
2. Baymetov, K.I. Features of cultivation of local varieties of apricot in Uzbekistan / K.I. Baymetov, M.K. Turdieva, P. Nazarov. – Tashkent. – 2011. – 26 P.
3. Yamaletdinova, M.F. Analysis of the physical characteristics of apricot kernels / M.F. Yamaletdinova, M.S. Narziyev // Universum: Technical Sciences. – 2019. – No. 5 (62). – P. 45–48.
4. Yamaletdinova, M.F. Experimental studies for studying the process of water absorption of apricot seeds / M.F. Yamaletdinova, M.S. Narziyev, D.N. Hikmatov // Academicia – An International Multidisciplinary Research Journal. – 2020. – Vol. 10, No. 10. – P. 931–938.
5. Yamaletdinova, M.F. System approach to the analysis of processes carrying out on technological line of production of salted stone from apricot fruit / M.F. Yamaletdinova, M.S. Narziyev, D.N. Hikmatov // International Journal of Advanced Science and Technology. – 2032. – Vol. 29, No. 11. – P. 2028–2032.

6. Akhone, M.A. Apricot Kernel: Bioactivity, Characterization, Applications, and Health Attributes / M.A. Akhone, A. Bains, M.M. Tosif, P. Chawla, S. Fogarasi // Foods. – 2022. – Vol. 11, No. 15.
7. Nema, P.K. Apricot kernel characterization, oil extraction, and its utilization: a review / P.K. Nema [et al.] // Food Science and Biotechnology. – 2023. – Vol. 32. – P. 249–263.
8. Mahde, N.F. Using apricot seed kernels for the development of supplemented cakes / N.F. Mahde, M.I. A. Fayed // Caspian Journal of Environmental Sciences. – 2022. – Vol. 20, No. 5. – P. 911–918.
9. Sheikh, M.A. Effects of controlled microwave heat treatment on the compositional attributes, antioxidant potential, and anti-nutritional components of apricot kernel flour / M.A. Sheikh [et al.] // Journal of Food Measurement and Characterization. – 2025. – Vol. 19, No. 3. – P. 1859–1873. – DOI: 10.1007/s11694-024-03079-4.
10. Allobergenova, A. Research Progress on Drying and Processing Technologies of Apricot Fruits and Secondary By-products in Central Asia / A. Allobergenova, S.B. Esanov, A.A. Sharipov // Journal of Food Engineering and Technology. – 2024. – Vol. 13, No. 2. – P. 112–118.

INFRASTRUCTURE AND TRANSPORT

CONSTRUCTION, ARCHITECTURE AND HOUSING AND UTILITIES

Received: 16.05.2026
Accepted: 21.09.2026
Published: 28.10.2026

УДК 69.059.7+699.86

DOI: 10.32743/UniTech.2026.151.10.23434

Rational selection and justification of wall insulation technology for the reconstruction of large-panel residential buildings under the conditions of Uzbekistan

Khasanov Bakhrom
Associate professor
Tashkent University of Architecture and Civil Engineering
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Bakhriddinova Zilola
Researcher
Tashkent University of Architecture and Civil Engineering,
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Bakhriddinova Zilola
Researcher
Tashkent University of Architecture and Civil Engineering
Republic of Uzbekistan, Tashkent
E-mail: bahriddinova.zilola@mail.ru

Рациональный выбор и обоснование технологии изоляции стен для реконструкции крупнопанельных жилых зданий в условиях Узбекистана

Хасанов Бахром Баходирович
доц.
Ташкентский архитектурно-строительный университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Библиографическое описание: Хасанов Б.Б., Бахриддинова З.Ж.Қ., Бахриддинова З.Ж.Қ. Рациональный выбор и обоснование технологии изоляции стен для реконструкции крупнопанельных жилых зданий в условиях Узбекистана // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23434

For citation: Khasanov B., Bakhriddinova Z., Bakhriddinova Z. Rational selection and justification of wall insulation technology for the reconstruction of large-panel residential buildings under the conditions of Uzbekistan // Universum: Technical Sciences : electronic scientific journal. 2026. No. 10(151). Available at: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23434

Бахриддинова Зилола Жаҳонгир қизи
научный сотрудник,
Ташкентский архитектурно-строительный университет,
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Бахриддинова Зилола Жаҳонгир қизи
научный сотрудник
Ташкентский архитектурно-строительный университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Abstract

The aim of this study is to justify a rational method for selecting wall-insulation technology when reconstructing large-panel residential buildings in Uzbekistan. Four options are compared: ETICS with mineral wool, ETICS with expanded polystyrene (EPS), a ventilated facade with mineral wool, and internal mineral-wool insulation. The assessment combines a steady-state thermal calculation with weighted multi-criteria analysis of thermal bridges, moisture and fire safety, constructability, durability, and relative cost. In the representative scenario, 100 mm of external insulation reduces the wall U-value from approximately 1.39 to 0.29 – 0.30 W/(m²·K), or by about 78 – 79 %. ETICS with mineral wool provides the best overall balance under the adopted criteria. ETICS with EPS is a cost-sensitive alternative, while a ventilated facade offers strong moisture resistance and durability at higher cost. Internal insulation is suitable mainly where external work is restricted. The proposed method supports preliminary selection; final design requires project-specific structural, hygrothermal, fire, and regulatory verification.

Аннотация

Цель исследования – обосновать рациональный выбор технологии теплоизоляции стен при реконструкции крупнопанельных жилых зданий в условиях Узбекистана. Сопоставлены четыре варианта: система ETICS с минеральной ватой, ETICS с пенополистиролом (EPS), вентилируемый фасад с минеральной ватой и внутренняя теплоизоляция минеральной ватой. Методика объединяет стационарный теплотехнический расчет и взвешенную многокритериальную оценку мостиков холода, влагозащиты, пожарной безопасности, технологичности, долговечности и относительной стоимости. В расчетном примере наружная теплоизоляция толщиной 100 мм снижает коэффициент теплопередачи стены примерно с 1,39 до 0,29 – 0,30 Вт/(м²·К), то есть на 78 – 79 %. По принятой системе критериев наилучший общий результат показала ETICS с минеральной ватой. ETICS с EPS целесообразна при ограниченном бюджете, вентилируемый фасад – при повышенных требованиях к влагостойкости и долговечности, а внутренняя теплоизоляция – преимущественно при невозможности наружных работ. Предложенная методика предназначена для предварительного выбора; окончательное решение должно основываться на обследовании здания и действующих требованиях Узбекистана.

Keywords: large-panel residential building, reconstruction, facade retrofit, thermal insulation, ETICS, ventilated facade, thermal bridge, energy efficiency.

Ключевые слова: крупнопанельное жилое здание, реконструкция, модернизация фасада, теплоизоляция, ЭТИКА, вентилируемый фасад, тепловой мост, энергоэффективность.

Introduction

Large-panel residential construction enabled rapid urban housing delivery across the former Soviet space. Many such buildings remain in service, but their external envelopes frequently exhibit aged panel joints, local cracking, insufficient thermal resistance, uncontrolled air leakage and pronounced thermal bridges at floor edges, balconies, window reveals and panel connections. These defects are not merely energy issues: they influence surface temperature, condensation risk, indoor comfort and facade durability [8].

Uzbekistan presents a demanding retrofit context. Building envelopes must operate under strong summer solar loads and high outdoor temperatures while also providing adequate winter thermal protection. A reconstruction solution therefore cannot be selected solely by nominal insulation conductivity. It must preserve or improve the moisture regime of the wall, accommodate existing-panel movements, remain repairable, satisfy facade fire requirements and be feasible on occupied multi-family buildings [2; 11; 12].

Published studies of renovated concrete large-panel apartment buildings show that envelope renovation can materially reduce delivered and heating energy demand, while also emphasizing the importance of thermal bridges and ventilation. Research on renovated apartment buildings further demonstrates that junctions can remain a substantial fraction of transmission losses after insulation if details at windows, balconies and wall–floor interfaces are not solved. These findings justify treating large-panel facade reconstruction as a system-level problem rather than as a simple increase in insulation thickness [4; 10].

The aim of this study is to justify a rational procedure for selecting wall-insulation technology for large-panel residential buildings in Uzbekistan. The procedure compares four retrofit systems by their thermal performance, thermal-bridge mitigation, moisture and fire safety, constructability, durability, and relative cost, and defines the checks required before a project-specific decision.

2. Materials and Methods

2.1. Research design and alternatives. The research is a comparative engineering study rather than a report of field measurements. Numerical values used in the worked example are explicitly treated as representative assumptions for method demonstration; they must not be substituted for an energy audit of a specific building.

Table 1. Retrofit alternatives considered in the study

Code	Alternative	System description
A1	ETICS with mineral wool (MW)	Adhesive/mechanical fixing, mineral-wool boards, reinforced base coat and render finish.
A2	ETICS with expanded polystyrene (EPS)	Adhesive/mechanical fixing, EPS boards, reinforced base coat and render finish.
A3	Ventilated facade with MW	Mechanical substructure, mineral wool, wind barrier/air cavity and rainscreen cladding.
A4	Internal insulation with MW	Insulation installed from the room side with a controlled vapour/air layer and internal lining.

2.2. Thermal calculation

The steady-state thermal resistance approach follows the general logic of ISO 6946. For a plane layer, thermal resistance is calculated as: [7] where R is thermal resistance (m²·K/W), d is layer thickness (m), and λ is declared/design thermal conductivity (W/(m·K)). The overall thermal transmittance is:

$$\mathbf{R = d / \lambda} \quad (1)$$

where R is thermal resistance (m²·K/W), d is layer thickness (m), and λ is declared/design thermal conductivity (W/(m·K)). The overall thermal transmittance is:

$$\mathbf{U = 1 / R_{total}} \quad (2)$$

For the worked scenario, the representative existing-wall total resistance is assumed as R_existing = 0.72 m²·K/W (U_existing ≈ 1.39 W/(m²·K)). The assumed insulation conductivities are 0.036 W/(m·K) for mineral wool and 0.038 W/(m·K) for EPS. External systems use 100 mm insulation; the internal option uses 80 mm. These are scenario inputs, not measured properties of a particular Uzbek building.

2.3. Multi-criteria decision analysis. A weighted-sum model was used to avoid choosing a technology on U-value alone. Seven criteria were normalized to a five-point scale. Weights were assigned to reflect reconstruction priorities: thermal performance 0.28; relative investment burden 0.18; fire performance 0.14; moisture robustness 0.12; thermal-bridge mitigation 0.12; constructability 0.10; durability 0.06. The composite score is:

$$\mathbf{S_j = \Sigma(w_i \times s_{ij}),\ \Sigma w_i = 1} \quad (3)$$

The weighting is a decision-support assumption and should be reweighted by the client, designer and authorities for a specific project. Fire-safety scoring is deliberately conservative and does not replace a code-compliance assessment of the complete facade system.

2.4. Diagnostic prerequisites. Before insulation design, the existing building should be surveyed for panel geometry and movement, condition of external concrete layers, corrosion or distress of embedded/interlayer connections, joint-seal degradation, moisture ingress, balcony and parapet defects, window replacement history, substrate pull-off strength and the capacity of the base material for mechanical anchors. Long-term investigations of precast residential facades underline the importance of assessing interlayer connections before adding new facade loads [9].

3. Results

3.1. Calculated thermal performance

Table 2. Calculated thermal performance of the insulation alternatives

Alternative	Insulation	d, mm	R_add, m²K/W	U_after, W/(m²K)	Opaque-wall U reduction, %
ETICS–MW	MW	100	2.78	0.29	79.4
ETICS–EPS	EPS	100	2.63	0.30	78.5
Ventilated facade–MW	MW	100	2.78	0.29	79.4

Alternative	Insulation	d, mm	R_add, m²K/W	U_after, W/(m²K)	Opaque-wall U reduction, %
Internal insulation–MW	MW	80	2.22	0.34	75.5

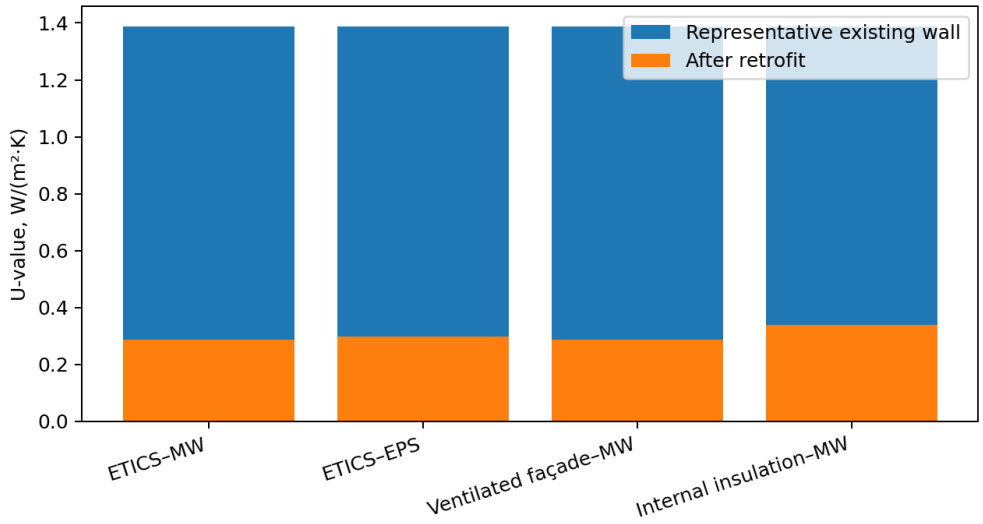


Figure 1. Calculated U-values for the representative analytical scenario

All four options substantially improve one-dimensional opaque-wall resistance in the illustrative scenario. The external 100 mm mineral-wool solutions reach approximately 0.29 W/(m²·K), while the 100 mm EPS system reaches approximately 0.30 W/(m²·K). The 80 mm internal mineral-wool option is approximately 0.34 W/(m²·K). These values describe plane-wall heat flow only; actual building heat loss will also depend on thermal bridges, windows, air leakage, ventilation, orientation and operation.

3.2. Thermal bridges and moisture behaviour. Continuous external insulation has a fundamental advantage in large-panel construction because it can cover panel joints and floor-edge zones. Literature on renovated apartment buildings reports that thermal bridges can remain important after retrofit and that simply increasing wall-insulation thickness cannot compensate for poorly resolved junctions. Window reveals, sill/head details, balcony slabs, parapets and plinths therefore require explicit two-dimensional or three-dimensional verification where their contribution is significant.

Internal insulation interrupts continuity at floors and internal partitions and moves the original concrete wall toward colder winter temperatures. Without careful vapour and airtightness design, this increases sensitivity to interstitial condensation and mould at junctions. It is therefore treated here as a constrained solution for facades where external work is impossible rather than as the default strategy.

3.3. Multi-criteria comparison

Table 3. Multi-criteria comparison of the insulation alternatives

Alternative	Thermal	Cost	Fire	Moisture	Bridge control	Constructability	Weighted score
ETICS–MW	5.00	4.48	5.0	4.5	4.8	4.4	4.69
ETICS–EPS	4.94	4.81	2.8	4.1	4.8	4.6	4.39

Alternative	Thermal	Cost	Fire	Moisture	Bridge control	Constructability	Weighted score
Ventilated facade–MW	5.00	3.00	4.8	4.9	4.7	3.6	4.42
Internal insula-tion–MW	4.76	5.00	5.0	2.5	2.4	3.1	4.02

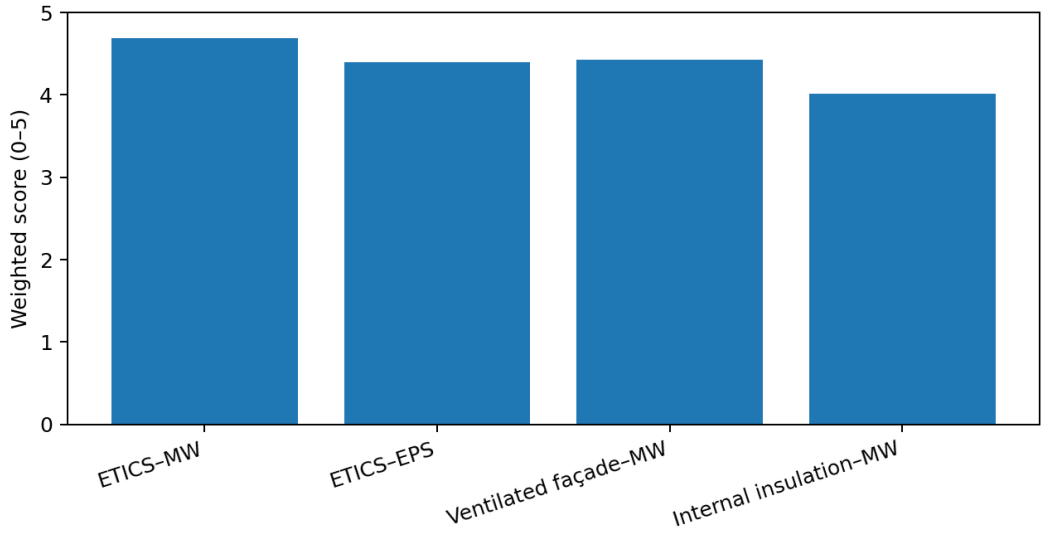


Figure 2. Weighted multi-criteria scores under the adopted assumptions

Within the adopted weighting scheme, ETICS–MW achieves the highest composite score. This result is not a universal ranking: it follows from the stated weights and assumptions. ETICS–EPS improves the cost criterion but requires project-specific facade fire verification; the ventilated facade scores strongly in moisture robustness and durability but carries a higher relative investment burden; internal insulation is disadvantaged by discontinuity at structural junctions and moisture sensitivity.

3.4. Recommended technological sequence for external ETICS retrofit

1. Engineering survey and defect mapping: document cracks, panel-joint condition, moisture paths, concrete delamination, facade attachments, balconies, parapets and plinths.

2. Structural and substrate verification: determine whether existing external layers and connections are stable; repair loose concrete and corroded reinforcement; perform pull-off and anchor pull-out tests on representative zones.

3. Joint rehabilitation and airtightness strategy: remove failed sealants where required, repair panel joints and define interfaces with windows, roofs, balconies and service penetrations.

4. Set-out and base preparation: clean the substrate, correct significant unevenness and install starter/plinth details compatible with splash-water exposure.

5. Insulation installation: apply system-compatible adhesive and mechanical anchors according to the tested system, substrate and wind actions; stagger board joints and avoid continuous gaps.

6. Thermal-bridge detailing: return insulation into window reveals where geometry allows; maintain continuity at floor edges, corners, parapets and balcony interfaces; model critical junctions when necessary.

7. Reinforced base coat: embed alkali-resistant glass-fibre mesh with specified overlaps and additional diagonal reinforcement around openings.

8. Fire and compartmentation details: provide the required non-combustible zones, cavity barriers or other measures dictated by the selected system, building height and current regulations.

9. Finish and weather protection: apply compatible primer/render and seal interfaces so that bulk rainwater is drained outward without trapping moisture.

10. Quality control and handover: inspect anchor pattern, board bonding, flatness, mesh position, layer thickness, penetrations and sealants; record concealed work and establish a maintenance plan.

4. Discussion

The analysis supports external insulation as the technically preferable direction for typical large-panel reconstruction because it improves the thermal field of the original concrete shell and can reduce the severity of repeating panel-joint thermal bridges. This conclusion is consistent with published large-panel renovation research, which reports substantial energy reductions after envelope renovation but also identifies thermal bridges and ventilation as critical residual issues [5; 6].

ETICS is attractive because it combines continuous insulation, weather protection and facade renewal in a comparatively lightweight build-up. Reviews of ETICS describe EPS and mineral wool as the dominant insulation types and emphasize compatibility among adhesive, insulation, reinforcement and finish layers. For reconstruction, the system should therefore be specified as an assessed, compatible kit rather than assembled from unrelated products [3].

For Uzbekistan, material selection should reflect both summer and winter performance. A light-coloured, solar-resistant finish can reduce facade surface temperatures, while vapour and rainwater detailing must prevent moisture accumulation. Mineral wool offers non-combustibility and vapour openness, making it a robust baseline where fire strategy is a major criterion. EPS can offer a lower-cost and thermally efficient alternative, but its use must follow the building-height, fire-barrier and complete-system requirements applicable to the project [1].

A ventilated rainscreen can be preferable where the existing facade is highly irregular, where a drained and ventilated outer layer is valuable, or where long-term replaceability of cladding is prioritized. Its disadvantages are the substructure, point thermal bridges from brackets, greater dead load, more complex fire-stopping and typically higher capital cost. The latest life-cycle research also shows that environmental conclusions depend strongly on the materials and system boundaries used, so environmental superiority should not be assumed without project-specific LCA.

5. Conclusions

1. For large-panel residential buildings, the rational insulation decision must address panel-joint thermal bridges, moisture safety, fire performance and substrate reliability in addition to nominal insulation conductivity.

2. In the representative calculation, adding 100 mm of external MW or EPS reduces plane-wall U-value from about 1.39 to about 0.29–0.30 W/(m²·K), an indicative 78–79 % reduction in one-dimensional opaque-wall transmission.

3. Under the adopted multi-criteria weights, ETICS with mineral wool provides the strongest balance for typical reconstruction conditions; ETICS with EPS is a cost-sensitive alternative subject to complete facade fire compliance.

4. Ventilated facades are technically robust for moisture management and durability but generally require higher investment and more complex detailing. Internal insulation should be reserved for constrained cases and verified hygrothermally.

5. The decisive construction-quality measures are rehabilitation of panel joints, verified anchorage, continuous insulation at critical junctions, correct window/reveal details, controlled water drainage, compatible system components and documented quality control.

6. Final design for a real building must use current Uzbek regulations and project-specific climatic, structural, fire, hygrothermal and economic data; the analytical values in this article are not a substitute for those verifications.

References

1. Amaro B., Saraiva D. de Brito J., Flores-Colen I. Inspection and diagnosis system of ETICS on walls // Construction and Building Materials. – 2014. – Vol. 47. – P. 1257–1267.
2. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. ASHRAE Handbook – Fundamentals. – Atlanta: ASHRAE, 2025.
3. Barreira E. de Freitas V.P. Experimental study of the hygrothermal behaviour of External Thermal Insulation Composite Systems (ETICS) // Building and Environment. – 2013. – Vol. 63. – P. 31–39.
4. Ilomets S., Kuusk K., Paap L., Arumägi E., Kalamees T. Impact of linear thermal bridges on thermal transmittance of renovated apartment buildings // Journal of Civil Engineering and Management. – 2017. – Vol. 23. – P. 96–104. – DOI: 10.3846/13923730.2014.976259.
5. ISO 10211:2017. Thermal bridges in building construction – Heat flows and surface temperatures – Detailed calculations. – Retrived from: (accessed date: 07.10.2026) [Электронный ресурс]. – URL: https://cdn.standards.iteh.ai/samples/65710/8bcd85e2b5b9494eae9617b2ca6b54a8/ISO-10211-2017.pdf (accessed: 18.10.2026).
6. ISO 13788:2012. Hygrothermal performance of building components and building elements – Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation – Calculation methods. – Retrived from: (accessed date: 09.10.2026) [Электронный ресурс]. – URL: https://cdn.standards.iteh.ai/samples/51615/261e3f395b8a425983c1eb1a5f05d3ca/ISO-13788-2012.pdf (accessed: 18.10.2026).
7. ISO 6946:2017. Building components and building elements – Thermal resistance and thermal transmittance – Calculation methods. – Retrived from: (accessed date: 05.10.2026) [Электронный ресурс]. – URL: https://cdn.standards.iteh.ai/samples/65708/12916cda1911488fa6f05e404c995433/ISO-6946-2017.pdf (accessed: 18.10.2026).
8. Joo N.-Y., Song, S.-Y. Thermal insulation performance of wall-to-floor joints in precast concrete sandwich panel systems for off-site construction of apartment buildings // Energy and Buildings. – 2026. – Vol. 367. – Art. 117743. – DOI: 10.1016/j.enbuild.2026.117743.

9. Krentowski J.R., Knyziak P., Mackiewicz M. Durability of interlayer connections in external walls in precast residential buildings. Engineering Failure Analysis. – Art. 105059. – 2021. – Vol. 121. – DOI: 10.1016/j.engfailanal.2020.105059.
10. Kuusk K., Kalamees T., Link S., Ilomets S., Mikola A. Case-study analysis of concrete large-panel apartment building at pre- and post low-budget energy-renovation // Journal of Civil Engineering and Management. – 2017. – Vol. 23. – P. 67–75. – DOI: 10.3846/13923730.2014.975741.
11. Sanitarnyye normy, pravila i gigiyenicheskiye normativy Respubliki Uzbekistan [Sanitary norms, rules and hygienic standards of the Republic of Uzbekistan] – Retrived from: (accessed date: 04.10.2026) // nrm.uz [Электронный ресурс]. – URL: https://nrm.uz/contentf?doc=309858_sanitarnye_pravila_i_normy_proektirovaniya_jilyh_domov_v_klimaticheskih_usloviyah_uzbekistana_%28sanpin_ruz_n_0146-04%29_%28utverjdeny_glavnym_gosudarstvennym_sanitarnym_vrachom_ruz_03_05_2004_g_%29&products=1_vse_zakonodatelstvo_uzbekistana. (accessed 18.10.2026).
12. World Bank. Energy efficiency and building-sector modernization resources for Europe and Central Asia. – Washington, DC: World Bank. – Retrived from: (accessed date: 05.10.2026) [Электронный ресурс]. – URL: https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/099311201312312135 (accessed: 18.10.2026).

TRANSPORT AND TRANSPORT SYSTEMS

Received: 26.09.2026
Accepted: 20.10.2026
Published: 28.10.2026

УДК 629.3.014.1+621.3

Multi-source energy system as a promising direction for the development of hybrid vehicles

Tolibjonov Tohirjon Bakhtiyor ugli
Master's Student, Tashkent State Technical University
Uzbekistan, Tashkent
E-mail: tolibjonovtohir980@gmail.com

Ishmuratov Khikmat Kakharovich
PhD, Professor
Tashkent State Technical University
Uzbekistan, Tashkent

Hamroev Ramzjon Komiljon ugli
PhD
Tashkent State Technical University
Uzbekistan, Tashkent

Многоисточниковая энергетическая система как перспективное направление развития гибридных автомобилей

Толибжонов Тохиржон Бахтиёр угли
магистрант
Ташкентский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Ишмуратов Хикмат Каххарович
PhD, проф.
Ташкентский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Хамроев Рамзжон Комилжон угли
PhD
Ташкентский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Библиографическое описание: Толибжонов Т.Б.У., Ишмуратов Х.К., Хамроев Р.К.У. Многоисточниковая энергетическая система как перспективное направление развития гибридных автомобилей // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23588

For citation: Tolibjonov T.B.U., Ishmuratov K.K., Hamroev R.K.U. Multi-source energy system as a promising direction for the development of hybrid vehicles // Universum: Technical Sciences : electronic scientific journal. 2026. No. 10(151). Available at: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23588

Abstract

Improving the energy efficiency of hybrid vehicles requires a comprehensive approach to the use of available onboard energy flows. This study analyzes parallel, series, plug-in hybrid, and range-extender architectures and proposes a multi-source energy system based on a series-hybrid configuration. In the proposed system, the internal combustion engine operates mainly as a generator drive in a stable and efficient mode, while the traction battery functions as a central energy buffer and storage unit. Regenerative braking, exhaust-gas energy recovery, cooling-system heat recovery, thermoelectric generation, and solar energy are considered additional energy sources. The analysis indicates that 30–35 % of fuel energy may be lost with exhaust gases and 25–30 % through the cooling system. Regenerative braking can recover approximately 10–25 % of energy in urban operation, while turbocompounding and thermoelectric conversion provide additional efficiency potential. The proposed concept enables coordinated management of primary and secondary energy flows and represents a promising direction for improving overall fuel utilization in hybrid vehicles under real operating conditions. The aim of this study is to analyze the energy recovery potential of hybrid vehicle powertrain architectures and to develop a conceptual multi-source energy system based on a series-hybrid configuration that integrates primary and secondary energy flows to improve overall energy utilization.

Аннотация

Повышение энергоэффективности гибридных автомобилей требует комплексного использования всех доступных энергетических потоков транспортного средства. В статье проанализированы параллельная, последовательная, подключаемая гибридная схемы и архитектура Range Extender, а также предложена многоисточниковая энергетическая система на базе последовательной гибридной компоновки. В предлагаемой системе двигатель внутреннего сгорания преимущественно работает как привод генератора в устойчивом и эффективном режиме, а тяговая аккумуляторная батарея выполняет функции центрального накопителя и энергетического буфера. В качестве дополнительных источников рассматриваются рекуперативное торможение, использование энергии отработавших газов, тепла системы охлаждения, термоэлектрическая генерация и солнечная энергия. Анализ показывает, что 30–35 % энергии топлива может теряться с отработавшими газами и 25–30 % через систему охлаждения. Рекуперативное торможение позволяет возвращать примерно 10–25 % энергии в городском цикле, а турбокомпаундная система и термоэлектрическое преобразование создают дополнительный потенциал повышения эффективности. Предлагаемая концепция обеспечивает согласованное управление первичными и вторичными энергетическими потоками и является перспективным направлением повышения эффективности использования топлива в гибридных автомобилях. Такой подход позволяет снизить долю безвозвратных энергетических потерь, стабилизировать режим работы двигателя и повысить эффективность энергетического баланса автомобиля в эксплуатации. Целью исследования является анализ потенциала рекуперации энергии в силовых установках гибридных автомобилей и разработка концептуальной многоисточниковой энергетической системы на основе последовательной гибридной схемы, обеспечивающей объединение первичных и вторичных энергетических потоков для повышения эффективности использования энергии.

Keywords: hybrid vehicles, energy efficiency, series hybrid, regenerative braking, waste heat, battery.

Ключевые слова: гибридные автомобили, энергоэффективность, последовательный гибрид, рекуперативное торможение, тепловые потери, аккумулятор.

Introduction

The development of road transport is accompanied by increasingly strict requirements for fuel economy and rational use of energy resources. Even when the internal combustion engine is improved, a considerable part of fuel energy is not converted into useful mechanical work. According to the sources reviewed in the initial material, approximately 30–35 % of the fuel energy leaves the engine with exhaust gases and another 25–30 % is removed through the cooling system [1-3]. These losses form a substantial reserve that can potentially be used in an electrified powertrain. At the same time, modern hybrid vehicles increasingly rely on traction batteries and external charging. In plug-in hybrids and range-extender vehicles, long periods of electric-only operation can reduce the operating time of the engine-generator unit, even though its mass remains part of the vehicle. From the standpoint of onboard fuel-energy utilization, this makes it important to consider a hybrid power plant as a single energy system rather than as a simple combination of an engine and a battery [4-8]. In such a system, the internal combustion engine should operate as close as possible to its efficient operating range, the battery should accumulate and redistribute energy, and secondary energy flows should be returned to the electrical system whenever technically possible [9-10].

The objective of this study is to evaluate the potential for utilizing primary and secondary energy flows in hybrid vehicles and to propose a multi-source energy system based on a series-hybrid architecture. To achieve this objective, the main hybrid powertrain configurations are compared, the principal energy-loss and recovery pathways are analyzed, and a conceptual architecture for integrating regenerative braking, exhaust-gas energy recovery, engine waste-heat recovery, and supplementary renewable energy sources into a common electrical system is developed.

Materials and methods

The study compares four hybrid powertrain architectures: parallel, series, plug-in hybrid, and range extender. The series-hybrid configuration was selected as the basis of the proposed multi-source system because the internal combustion engine operates independently of wheel speed and drives only the generator. The analysis considered the main vehicle energy-loss and recovery channels.

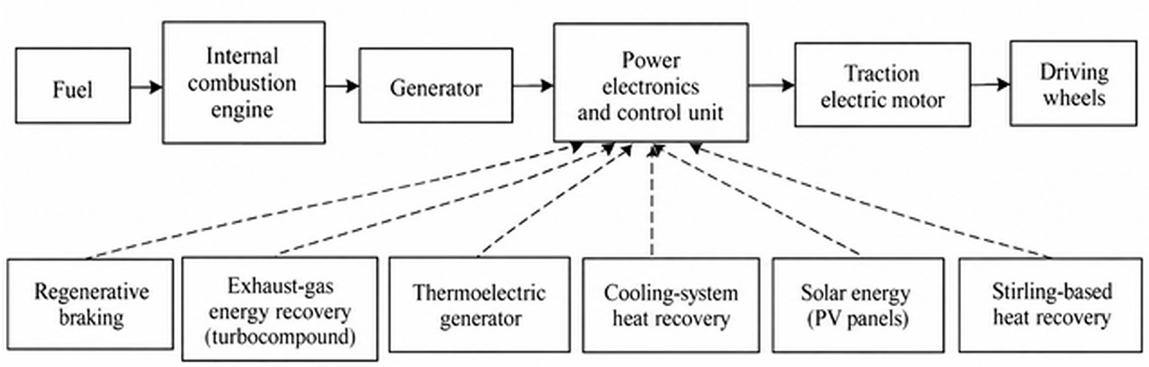


Figure 1. Proposed multi-source energy-flow architecture for a series-hybrid vehicle

According to the reviewed sources, approximately 30–35 % of fuel energy is lost through exhaust gases and 25–30 % through the cooling system. Regenerative braking can recover about 10–25 % of energy during urban operation, while turbocompounding can improve fuel efficiency by approximately 5 %. Thermoelectric generators convert waste heat into electricity with an efficiency of about 5–8 %. Based on these quantitative indicators, the proposed architecture integrates regenerative braking, exhaust-gas recovery, cooling-system heat recovery, thermoelectric generation, and other auxiliary sources through a common battery buffer.

Results and discussion

The quantitative comparison identified exhaust-gas and cooling-system heat as the two largest energy-loss channels of the internal combustion engine. Exhaust gases account for approximately 30–35 % of the fuel energy, while 25–30 % is rejected through the cooling system; together, these losses represent about 55–65 % of the initial fuel-energy input. In addition, regenerative braking can recover approximately 10–25 % of braking energy during urban operation and return it directly to the electrical storage system. For exhaust-energy recovery, turbocompounding has demonstrated an approximately 5 % improvement in fuel efficiency in heavy-duty diesel applications, whereas thermoelectric generators convert available waste heat into electricity with an efficiency of about 5–8 %.

As summarized in Table 1, these values represent different energy processes and must be interpreted separately. The 30–35 % and 25–30 % values indicate available thermal-loss streams, the 10–25 % value represents recoverable braking energy, the 5 % value reflects the reported fuel-efficiency improvement from turbocompounding, and the 5–8 % value represents thermoelectric conversion efficiency.

The results indicate substantial energy-recovery potential in a series-hybrid architecture. Approximately 30–35 % of fuel energy is lost through exhaust gases and 25–30 % through the cooling system, while regenerative braking can recover about 10–25 % of braking energy in urban operation. Turbocompounding may improve fuel efficiency by about 5 %, whereas thermoelectric generators provide approximately 5–8 % conversion efficiency. These values cannot be directly summed because they represent different physical processes. A common DC bus and traction battery enable recovered energy from multiple sources to be collected, stored, and redistributed efficiently.

Table 1. Secondary energy flows considered in the proposed multi-source system

Energy source or loss channel	Recovery / conversion method	Quantitative indicator stated in the reviewed material	Function in the proposed system
Vehicle kinetic energy during braking	Regenerative braking through the traction motor	Approximately 10–25% energy return in urban driving [2, 3]	Recharge the battery and reduce friction-brake demand
Exhaust-gas energy	Turbocompound system with electrical generation	About 30–35% of fuel energy may leave with exhaust gas; about 5% fuel-efficiency improvement is reported for a heavy-duty Scania application [1, 4]	Convert part of exhaust-stream energy into electrical power
Exhaust heat	Thermoelectric generator (TEG)	Approximately 5–8% conversion efficiency [5]	Provide supplementary electrical generation from temperature difference
Cooling-system heat	Thermal recovery / additional steam stage concept	About 25–30% of fuel energy is removed through the cooling system [1]; the proposed recovery route is experimental	Recover a portion of heat otherwise rejected by the radiator
Exhaust heat	Compact Stirling engine concept	Experimental; no mass automotive application or quantitative value is stated in the source material	Generate additional power from waste heat
External renewable input	Solar panels or other external sources	No quantitative value stated in the source material	Supplement the common electrical energy bus

Regenerative braking is currently the most practical recovery method, while exhaust-gas, thermoelectric, and cooling-system heat recovery offer additional potential. Further research should evaluate the overall energy balance, component mass and cost, and system performance under representative driving cycles.

Conclusion

The analysis confirms that a series-hybrid architecture is a suitable basis for a multi-source energy system because it separates engine operation from wheel speed and allows the battery to function as a common energy buffer. The main recoverable sources are braking energy, exhaust-gas energy and engine waste heat. Regenerative braking is the most practical recovery method, while turbocompounding, thermoelectric generation and cooling-heat recovery can provide additional benefits. The main advantage of the proposed concept is the coordinated integration of several recovery technologies within one electrical system. However, the available data do not allow the total efficiency gain of the combined system to be quantified. Further research should therefore focus on detailed energy-balance modelling and experimental validation of the overall fuel-saving potential.

References

1. Kumar L., Jain S. Electric propulsion system for electric vehicular technology: A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2014. – Vol. 29. – P. 924–940.
2. Shabana A.A. Dynamics of Multibody Systems. 4th ed. – Cambridge: Cambridge University Press, 2013. – 384 P.

3. Habchi W., Bair S. Quantifying the inlet pressure and shear stress of elastohydrodynamic lubrication // Tribology International. – 2023. – Vol. 182. – DOI: 10.1016/j.triboint.2023.108351.
4. Alagarsamy T. A Review on Optimal Design of Hybrid Electric Vehicles and Electric Vehicles // 3rd International Conference on Convergence Technology. – 2018. – P. 1–5.
5. Khamroyev R.K. Analysis of the potential for the use of electric vehicles and their operational performance // Universum: Technical Sciences. – 2021. – No. 12 (93). – P. 90–92.
6. Teixeira R.R., Moreira S.R.D.S., Tavares S.M.O. Multibody dynamics simulation of an electric bus // Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 114. – P. 470–477. – DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.094.
7. Yunuskhodjaev S., Abdumajidov R. Possibility of Application of Powder Metallurgy Methods in Repair of Agricultural Machinery // AIP Conference Proceedings. – 2024. – Vol. 3152, No. 1. – Art. 040001.
8. Ishmuratov K., Hamroev R.K., Kurbonov B.B., Mirzaev N.N. Method for Modeling the Process of Wear of Gear Teeth // Journal of Physics: Conference Series. – 2022. – Vol. 2176. – Art. 012096. – DOI: 10.1088/1742–6596/2176/1/012096.
9. Zhang Z., Wang Y., Lin J., Wang D. Study on factors influencing film formation of grease and calculation model for grease film thickness // Lubricants. – 2022. – Vol. 10, No. 6. – DOI: 10.3390/lubricants10060123.

ECOLOGY AND SAFETY

ECOLOGY AND TECHNOSPHERE SAFETY

Received: 25.09.2026
Accepted: 21.10.2026
Published: 28.10.2026

УДК + 551.311+004.9

DOI: 10.32743/UniTech.2026.151.10.23598

Automated digital monitoring systems in debris flow risk assessment: a review of technologies, methods, and practices

Djumaev Nodir Makhmudovich
Associate Professor of the Department of Mobilization and Ensuring the Stability of Facilities of the Civil Defense Institute of the Ministry of Emergency Situations
Uzbekistan, Tashkent
E-mail: k71031581@gmail.com

Adashev Shavkat Aminovich
senior Lecturer of the Department of Employment and Human Resource Management of the Center for Advanced Training of Employees of the Ministry of Employment and Poverty Reduction
Uzbekistan, Tashkent

Автоматизированные системы цифрового мониторинга в оценке риска селевых потоков: обзор технологий, методов и практик

Джумаев Нодир Махмудович
доц. кафедры мобилизации и обеспечения устойчивости объектов гражданской обороны Института гражданской обороны при Министерстве по чрезвычайным ситуациям
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Адашев Шавкат Аминович
ст. преп. кафедры занятости и управления человеческими ресурсами Центра повышения квалификации работников при Министерстве занятости и сокращения бедности
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Библиографическое описание: Джумаев Н.М., Адашев Ш.А. Автоматизированные системы цифрового мониторинга в оценке риска селевых потоков: обзор технологий, методов и практик // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23598

For citation: Djumaev N.M., Adashev S.A. Automated digital monitoring systems in debris flow risk assessment: a review of technologies, methods, and practices // Universum: Technical Sciences : electronic scientific journal. 2026. No. 10(151). Available at: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23598

Abstract

The review and analytical article examines the increasing role of automated digital monitoring systems in assessing and managing mudflow risks. Based on the analysis of scientific literature and international experience, it describes how technologies of remote sensing, the Internet of Things (IoT), geographic information systems (GIS) and artificial intelligence (AI) have transformed monitoring of mudflow hazards from a reactive approach to a predictive model. The main components of such systems — rain meters, soil moisture sensors, inclinometers, piezometers, seismic sensors, weather stations and water level measuring devices — as well as data processing functions, threshold analysis, predictive modeling, dynamic risk assessment and GIS-based mapping are systematized. The Mudflow Hazard Index (FHI) is provided as an analytical illustration, indicating its capabilities and limitations. The practical experience of implementing automated systems in Italy, the USA and Nepal is summarized, their advantages, difficulties and promising areas of development, including the use of AI, drones and climate models, are identified. Strategic recommendations have been formulated on policy integration, capacity building, financing, data standardization, public engagement, pilot programs, and research support. The article does not contain original field data, experiments, or author's calculations; all numerical examples are illustrative. The work is aimed at specialists in the field of emergency risk management, hydrology and digital technologies.

Аннотация

В обзорно-аналитической статье рассматривается возрастающая роль автоматизированных цифровых систем мониторинга в оценке и управлении рисками селевых потоков. На основе анализа научной литературы и международного опыта описывается, как технологии дистанционного зондирования, Интернета вещей (IoT), геоинформационных систем (ГИС) и искусственного интеллекта (ИИ) трансформировали мониторинг селевой опасности из реактивного подхода в прогностическую модель. Систематизированы основные компоненты таких систем — дождемеры, датчики влажности почвы, инклинометры, пьезометры, сейсмические датчики, метеостанции и устройства измерения уровня воды, — а также функции обработки данных, порогового анализа, прогнозного моделирования, динамической оценки риска и картирования на основе ГИС. В качестве аналитической иллюстрации приведён индекс селевой опасности (FHI) с указанием его возможностей и ограничений. Обобщён практический опыт внедрения автоматизированных систем в Италии, США и Непале, выявлены их преимущества, трудности и перспективные направления развития, включая применение ИИ, дронов и климатических моделей. Сформулированы стратегические рекомендации по политической интеграции, наращиванию потенциала, финансированию, стандартизации данных, вовлечению общественности, пилотным программам и поддержке научных исследований. Все числовые примеры в статье носят иллюстративный характер. Работа адресована специалистам в области управления чрезвычайными рисками, гидрологии и цифровых технологий.

Keywords: Flood hazard assessment, automated monitoring systems, IoT, remote sensing, GIS, early warning systems, digital sensors, real-time data, emergency risk management, hydrological forecasting.

Ключевые слова: Оценка селевой опасности, автоматизированные системы мониторинга, IoT, дистанционное зондирование, ГИС, системы раннего оповещения, цифровые датчики, данные в реальном времени, управление чрезвычайными рисками, гидрологическое прогнозирование.

Introduction

1. Literature review and review methodology

1.1. Methodology of the review

The literature review was conducted using Scopus, Web of Science, and Google Scholar databases for the period 2000 – 2024 using the keywords «debris flow monitoring», «automated early warning», «IoT hydrology», «GIS debris flow», and «mudflow risk assessment». The criteria for including sources were: peer review, description of monitoring technologies or methods, practical approbation or theoretical justification. A total of 10 sources were selected. Works not related to the topic of digital monitoring of mudflows were excluded from the review.

1.2. Main research directions

In recent years, significant progress has been made in the field of monitoring and forecasting mudflow risks, especially due to the introduction of automated digital monitoring systems [1]. The scientific works of foreign researchers demonstrate effective approaches in this field.

In [2], monitoring systems based on satellite images were developed in river basins and areas with a high risk of mudflows. They proved the possibility of detecting changes in water level from high-resolution images obtained from the Sentinel and MODIS satellites.

In [3], they proposed a methodology for modeling river floods and mudflow risks through hydraulic modeling based on raster digital terrain models (DEM). This study serves as an important tool for predicting mudflows through digital monitoring.

The model developed in [4] suggests assessing mudflow risk by combining remote sensing and geographic information systems (GIS). The available and effective monitoring solutions for regions of Africa and Asia with limited infrastructure are analyzed.

In [5], the authors used automated sensors and Internet of Things (IoT) technologies in hydrological monitoring. The mudslide early warning system they developed has shown particular effectiveness in mountainous areas with rapidly changing weather conditions.

Work [6] describes mudflow detection systems based on intelligent monitoring stations and cloud computing in the northern regions of India. They assessed the probability of floods using algorithms based on artificial intelligence.

In [7], the authors proposed microwave satellite technologies for monitoring surface water flows. They have developed methods for detecting the presence of water on the earth's surface through changes in signal intensity.

The paper [8] describes the need to integrate weather models with hydrological models. It is shown that linking automated monitoring systems with real-time weather data significantly improves efficiency.

In general, foreign studies show that automated digital monitoring systems are one of the most promising tools for detecting, assessing and preventing mudflow hazards. These systems achieve high efficiency when integrated with artificial intelligence, remote sensing, sensors, cloud technologies, GIS, and real-time data streams [9].

The purpose of the work is to systematize and critically analyze modern approaches to automated digital monitoring of mudflows, summarize international experience in using such systems, identify their capabilities and limitations, and formulate practical recommendations for the implementation of automated monitoring systems in mudflow—prone areas.

2. Overview of technologies and components of automated monitoring systems

An automated digital monitoring system is a tool for assessing and managing the risk of mudslides, which is a fast—moving destructive flow of water, mud and rocks, often caused by heavy rains, snowmelt or geological instability in mountainous areas. Such systems support real-time data, early warning, and decision-making using sensors, data analysis, communication networks, and predictive modeling. The main components and functions of such systems are systematized below based on the literature [10].

2.1. Sensors and measuring devices

Rain meters. Precipitation is measured; installed on a flat, open area; there are automatic types that transmit information to the center. They work without human intervention, consume little energy, and are applicable in any climate. The disadvantage is that measurements may be inaccurate due to snowfall, dust, and foliage. Nevertheless, it is a necessary tool for predicting mudflow hazards (Fig. 1) [10].



Figure 1. Rain gauge. Source: [clck.ru/3WbPQ2]

Soil moisture sensors. They are installed deep in the soil, measure the moisture level; they can work in conjunction with drones or GPS devices; remote control and information acquisition are possible. They are used both in agriculture and for assessing the risk of mudslides in mountainous areas. The disadvantage is that the results may vary for different types of soils. The advantage is assistance in early detection of landslides (Fig. 2) [10].



Figure 2. Wireless smart sensor for soil temperature and humidity. Source: [clck.ru/3WbPVU]

Inclinometers and tilt meters. The angles of inclination and displacement of the ground are measured; they are installed underground or on walls; the risk of landslides can be assessed using auxiliary data. They work continuously and automatically record information. If the installation is incorrect, the results may be incorrect. When connected to other sensors, a single monitoring system is created (Fig. 3, 4) [5].



Figure 3. Soil inclinometer. Source: [clck.ru/3WbPfu]

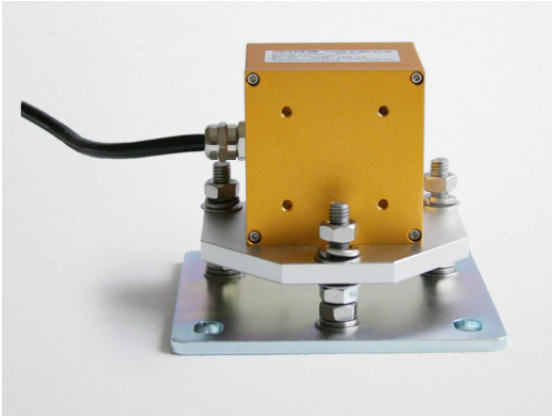


Figure 4. CUBE series tilt meter. Source: [https://monsol.ru/naklonmer-serii-cube/]

Piezometers. They measure the level and pressure of groundwater; they are placed inside wells; they can be used for a long time and give accurate results. They are used to analyze the movement of soil through groundwater pressure. The disadvantage is the complexity of installation and maintenance (Fig. 5) [5].



Figure 5. Piezometer 615 Drive-Point. Source: [clck.ru/3WbPoi]

Seismic sensors. They measure ground vibrations and seismic movements; are easy to install, can be placed at many points; detect mudflow tremors and provide real-time information. False signals from external influences are possible (Fig. 6) [7].



Figure 6. Wall-mounted seismic sensor (seismic sensor) Madas M90W Source: [clck.ru/3WbPsa]

Weather stations. Automatic stations measure air temperature, wind speed, pressure, humidity; transmit information to the center and help prepare forecasts; easily integrate with AI and IoT. The disadvantage is that maintenance is required in case of damage (Fig. 7) [5].



Figure 7. Autonomous meteorological Station Source: [clck.ru/3WbPvU]

Water level measuring devices. They are used to monitor water levels in rivers and canals; information is collected by automatic sensors; they help predict floods and mudflow hazards; notifications via SMS or signal are possible. The disadvantage is that a sudden change in the water level can lead to a mechanical malfunction (Fig. 8) [7].



Figure 8. Level gauge. Source: [clck.ru/3WbQ2C]

All sensors are connected to data loggers, which record information at certain intervals. Through wireless technologies (IoT, satellite or mobile networks), data is transmitted to centralized servers in real time, which is especially important in remote and mountainous areas [5].

2.2. Data processing and analysis

Cloud or on-premise servers process real-time data using algorithms, statistical models, or machine learning to assess risk levels. Geoinformation systems, integrating spatial data, make it possible to map and visualize mudflow-prone areas [6].

2.3. User interface and notification systems

Through control panels, data is displayed in real time in the form of graphs, heat maps, or risk assessments and is available to emergency management teams. Automated notification systems (SMS, e-mail, siren) warn the relevant authorities and the public when the established risk thresholds are exceeded [4].

2.4. Main functions in mudflow risk assessment

Mudflows are a very dynamic process that depends on rapidly changing environmental conditions. Automated systems, unlike traditional (manual) monitoring, provide continuous and high-frequency data collection. For example, precipitation data is accumulated every few minutes, which makes it possible to detect heavy rains saturating mountain slopes in a timely manner. Sensors of soil moisture and capillary pressure reflect the underground state, invisible to the naked eye [5].

Threshold analysis. The system compares environmental indicators — for example, the amount of precipitation (for example, 50 mm in 24 hours) or the level of soil moisture — with predefined risk standards. If these standards are exceeded, the warning system is automatically activated and gives a signal about the risk of a mudslide. For example, with a precipitation intensity of 10 mm/hour or a soil moisture level above 80 %, a warning about a village can be activated depending on local conditions [8].

Predictive modeling. Machine learning models based on historical mudflow data analyze the data in real time. They take into account the intensity of the rain, the type of soil (for example, clay or loam), the level of slope (for example, the risk increases at >30 °). These models determine the likelihood of mudslides in the region and the extent of their impact. For example, the Random Forest model or neural network, using cumulative precipitation, vegetation cover, and topographic data, can estimate the probability of a moderate mudflow in a designated area at 70 % [6].

Calculation of dynamic risk assessment. The system calculates risk levels for different geographical areas in real time and generates risk assessments. These scores are generated based on predefined thresholds and predictive models. The scores calculated for each region (for example, from 0 to 100) take into account: proximity to watercourses, population density, and the level of infrastructure provision. High-risk areas (for example, with a score above 80) are considered a priority for enhanced monitoring or preparation of an evacuation plan [6].

Early warning and distribution. Detecting the first signs of a mudslide (for example, a rapid increase in soil moisture or minor slope shifts), the system can automatically send warnings to local authorities, emergency services and the public via SMS, mobile applications or sirens; a time reserve is created that allows people to evacuate from dangerous areas, close roads or install protective barriers. For example, in areas with a high risk of mudslides — in the Alps or the Himalayas — automated systems have dramatically reduced human casualties, warning people a few hours before the disaster [5; 9].

2.5. GIS-based risk mapping

Data integration (fig. 9):

• Terrain data: Elevation data (DEM) is used to identify mudslide-prone slopes and steep plains;

• Soil composition: geotechnical data analyzes the underground composition and identifies areas with unstable soils;

• Historical data on mudflows: information about past events serves as the basis for forecasting models of future risks;

• Real-time sensor data: soil moisture sensors and rain meters provide continuously updated information [3; 4].

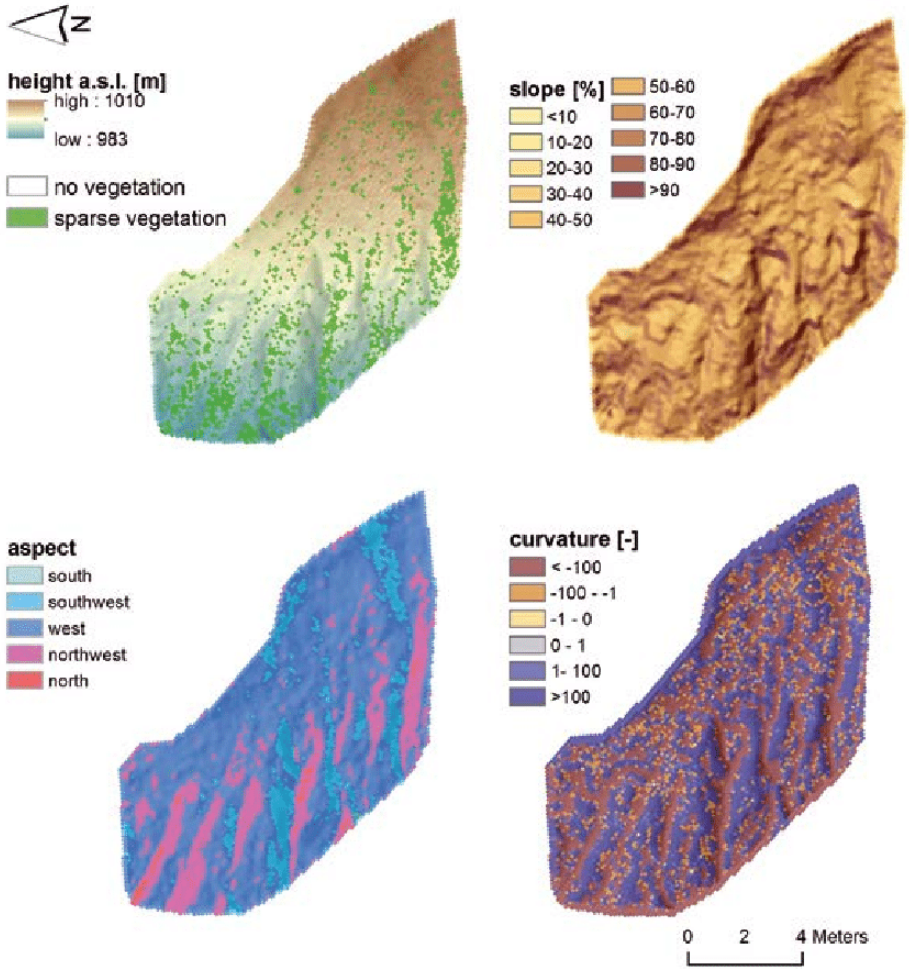


Figure 9. Digital terrain model maps. Source: [clck.ru/3WbQ5K]

Visualization. On maps created through GIS, various information layers are combined — relief, soils, historical data — and danger zones are marked with clear colors (red — high risk, yellow — medium). Sensor data is constantly updated on maps: for example, if high humidity is detected on a steep slope, the area is automatically marked as dangerous. In support of urban planning, maps identify areas unsuitable for construction and help administrations make decisions about zoning and land use [2].

Access. Web and mobile interfaces allow interested parties (planners, emergency services personnel) to view maps, analyze designated areas and receive information about danger on request; interactive functions (enabling/disabling data layers) increase the efficiency of use [6].

Advantages. Proactive risk management: the consequences of disasters are mitigated by early detection of hazardous areas; informed decisions: urban planners avoid construction in high-risk areas; real-time actions: live data helps to carry out timely evacuation or risk reduction measures; involvement of parties: accessible visualization tools make teams and official authorities active participants [4].

Long-term data analysis. In addition to real-time monitoring, the systems store data for long-term analysis.: identification of trends (for example, an increase in the frequency of mudslides due to climate change); improvement of predictive models by adding new data; support for scientific research on the causes of mudslides and prevention strategies (Fig. 10) [9].

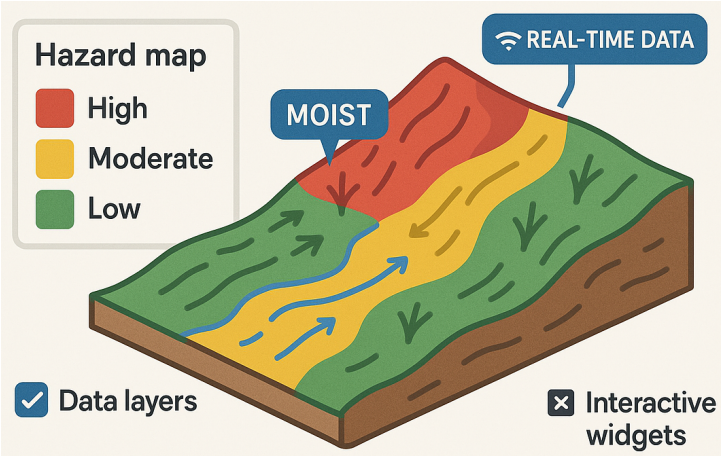


Figure 10. Conceptual scheme of the risk map. The scheme is illustrative and is not linked to a specific territory

3. Analytical illustration: Mudflow Hazard Index (FHI) as an example of a settlement tool

The FHI formula given below is considered not as an author's development or as the result of an original calculation, but as an illustration of the approach described in the literature [10]. The numerical example is for demonstration purposes and does not purport to reflect the actual characteristics of a particular basin. The coefficients α, β, γ are expert and require calibration for each region.

Mathematical models and formulas integrated with GIS are widely used in automated digital monitoring systems used to assess mudflow risk. One of the most common methods is the calculation of the mudflow Hazard Index (FHI) [10]:

$$\mathrm{FHI} = \alpha \cdot \frac{Q}{A} + \beta \cdot S + \gamma \cdot L$$

where: Q is the maximum water flow (m^3/s); A is the basin area (k^m2); S is the surface slope (%); L is the length of the flow path (km); α, β, γ are coefficients determined by specialists depending on the situation.

An illustrative example. Suppose the following conditional parameters are set for a mountain basin: Q = 120 m^3/s; A = 15 km^2; S = 25 %; L = 5 km; α = 0.5, β = 0.3, γ = 0.2.

$$\mathrm{FHI} = 0{,}5 \cdot \frac{120}{15} + 0{,}3 \cdot 25 + 0{,}2 \cdot 5 = 0{,}5 \cdot 8 + 7{,}5 + 1 = 4 + 7{,}5 + 1 = 12{,}5$$

Interpretation (conditional scale): 0 – 5 — low risk; 5 – 10 — moderate; 10 – 15 — high; >15 — extremely high. With FHI = 12.5, the risk is assessed as high [10].

Limitations. The formula allows quantifying mudflow risk and serves as a criterion for comparing risks in different geographical conditions. It can be calculated automatically when integrating sensor data and digital terrain models (DEM), which reduces the influence of the human factor and allows for real-time analysis [5]. The parameters Q, a, S, and L are considered as physical indicators of natural processes and together provide a holistic view of mudflow risk. When integrated with GIS and AI, the formula creates the possibility of building dynamic risk maps, automatic recognition of dangerous areas and early warning of the population [6].

However, the formula has significant limitations. The main problem is the subjectivity of the coefficients: α, β and γ are determined conditionally by specialists and are not specific to each pool, which creates a risk of overestimation or an increase in the risk level [10]. The formula does not cover all important factors: atmospheric pressure, type of precipitation (rain or snow), soil structure — which reduces the accuracy of the analysis. In addition, the formula is suitable mainly for small mountain basins; in regions with large river systems or complex terrain, it is advisable to use it in conjunction with other models [3; 8].

Thus, FHI can be considered as one of the practical methods for assessing mudflow risk, however, each pool requires an individual approach. The formula should be used as part of a comprehensive analysis, rather than as a «universal solution»; meteorological, geological, and local features should also be taken into account [8; 10].

4. Discussion: limitations and prospects

4.1. Advantages of automated systems

Automated systems have a number of advantages over traditional manual monitoring methods: accuracy and reproducibility (sensors provide highly accurate data, low human error) [5]; wide coverage and scalability (monitoring remote and hard-to-reach areas via satellite or IoT networks [2]); timely response (real-time data processing and notification function); cost-effectiveness (initial costs may be high, but automation reduces consumption in constant manual labor and on-site inspections); integration with other systems (forecast weather models, seismic networks, response platforms) [8]; community activation (delivery of alerts to stressed populations through mobile applications or local alarm systems) [9].

4.2. Labor and restrictions

Despite their superiority, automated systems face practical difficulties: high initial costs (installation of sensors, communication infrastructure and data processing systems requires large investments, especially for developing countries) [10]; maintenance (in harsh weather conditions sensors may require frequent repair or replacement); excessive data volume (large amount of data in if improperly controlled, it can overload the system or the decision maker); false positive and false negative signals (incorrect definition of thresholds or erroneous assumptions in the model can lead to a lack of necessary warnings or unjustified evacuation) [6]; coverage problems (in remote or underdeveloped areas, the system may not work fully due to missing infrastructure – Internet or electricity supply); problems involving the team (effective early warning system notification requires awareness and trust; regular explanatory and educational activities are necessary) [9].

4.3. Examples of practical application

Automated digital monitoring systems for mudflow risk have been successfully implemented in a number of regions around the world.

Italy (Alpine region). In the Italian Alps, there is a system for monitoring the risk of landslides and mudslides through a network of rain meters, soil sensors and radars (Fig. 11). In 2020, such a system in the Aosta Valley made it possible to timely warn the population about a large village and lay the foundation for evacuation measures [4].

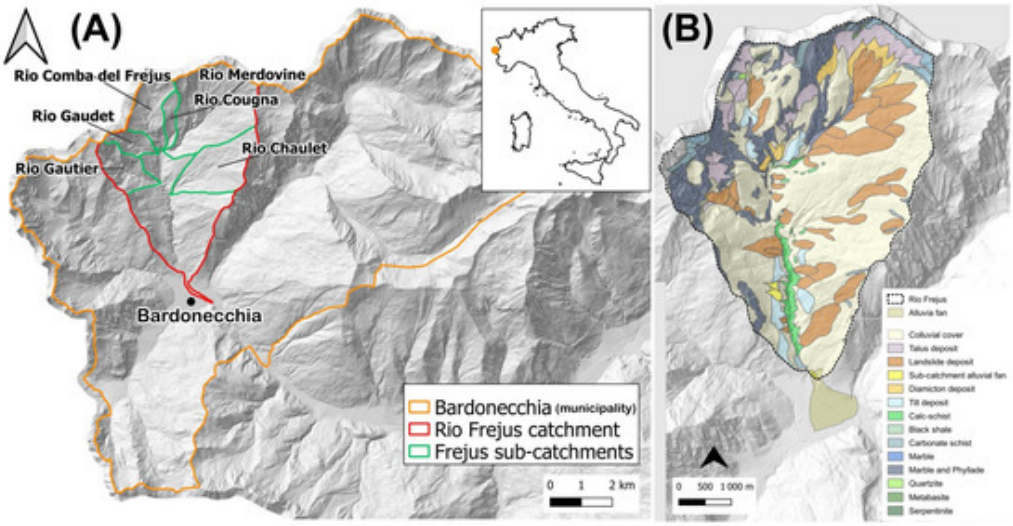


Figure 11. The basin of the Rio Fréjus stream and its tributaries in the area of the municipality of Bardonecchia (Italy, Piedmont region in the Western Alps): A) Relief map of the catchment area of the Rio Frejus River/stream; b) Detailed geomorphological/lithological map of the same basin with sediment designation. Source: [clck.ru/3WbQJ5]

The example is chosen as an illustration of a comprehensive approach applicable to the mountainous regions of Uzbekistan.

California, USA. After the devastating mudslides in Montecito in 2018 Automated systems have been implemented in California that provide information about precipitation and soil moisture in real time; they have proven effective in predicting possible flash floods after fires [5].

Nepal. In the Himalayas, IoT-based and satellite-based systems monitor remote, inaccessible slopes; this information serves as an important resource for local authorities and NGOs in preparing for emergencies [9].

4.4. Promising areas

Technology development expands the capabilities of automated monitoring systems: artificial intelligence and machine learning (updated algorithms provide more accurate results when analyzing multiparametric data) [6]; drones and remote sensing (drones with LiDAR or infrared images complement ground-based sensors, mapping changes in terrain in real time, Fig. 12) [7]; adaptation to climate change (systems are being developed that take into account factors that increase the risk of mudslides, such as heavy rains or rapid glacier subsidence) [8]; collective integration (notification and informing the population through mobile applications and social networks) [9].



Figure 12. DJI Matrice 300 quadcopter. Source: [clck.ru/3WbQYC]

4.5. Infrastructure costs and efficiency assessment

The implementation of an automated mudflow monitoring system requires significant primary infrastructure facilities -sensors, data transmission equipment (GSM, satellites, radio), solar panels, server centers, drones, remote control terminals, and spare parts. These costs can be particularly high for mountainous and hard-to-reach areas. An illustrative formula is used in the literature for an approximate assessment of economic efficiency [10]:

$$\text{IS} = \frac{(P \times V) - C}{C} \times 100\%$$

where IS is the economic efficiency (%); P is the proportion of the population or facilities saved from a possible disaster (%); V is the total value of the material assets saved; C is the cost of infrastructure implementation.

An illustrative example. If C = 500,000,V=2000000,V=2000000, P = 80 %, then:

$$\text{IS} = \frac{(0{,}8 \times 2\,000\,000) - 500\,000}{500\,000} \times 100 = 220\%$$

This means an effect of about 2.2 per 1 investment. The example is conditional; the technique requires a source [10] and real source data for a specific object.

4.6. Technical capacity, data integration and sustainability

Technical potential. Automated systems are based on high technologies, and their installations are insufficient. For effective use, it is necessary to properly understand the structure, operating principle, software and maintenance procedures. Working with sensors, drones, GIS platforms, and AI algorithms requires certain skills. The reliable and uninterrupted functioning of the system depends primarily on qualified specialists; it is necessary to constantly implement a system of their special training, retraining and practical application. In this area, the shortage of personnel is one of the main problems [10].

Data integration. Information from only one agency is not available for mudflow risk assessment and early warning. The exchange of information between meteorology, hydrology, urban planning, ecology and information technology, the harmonization of approaches and interaction through a single electronic platform increase efficiency. The biggest obstacle is the totality of data and insufficient agency interaction: if meteorological data is not related to mudflow topography, forecast accuracy decreases. It is advisable to build data integration at the level of public policy [8].

Stability. Natural disasters often disrupt infrastructure -electricity, communications, and the Internet. The monitoring system must be stable in order to function in extreme situations: it must have an autonomous power source, offline mode, and backup data storage channels. In practice, systems are briefly tested only under normal conditions, whereas in real poverty the main burden falls on these infrastructures; support by diesel generators, solar panels or satellite communications should be a mandatory requirement [9].

Development prospects. To increase the efficiency and sustainability of the system, it is necessary to develop in several directions: open technologies can reduce costs and attract the scientific community; the development of public-private partnerships expands financial resources and the introduction of new solutions; the involvement of the population in the monitoring process ensures public participation and prompt collection of information. In the future, such systems can work not only centrally, but also on the principle of «down up»: the population transmits information via a mobile application, entrepreneurs introduce technologies, and the state coordinates. This approach ensures the speed, inclusiveness and sustainability of the system [10].

Conclusion

The current review and analytical work does not claim to have original empirical results; its conclusions are based on the systematization of literature and international experience. Automated digital monitoring systems represent a significant step in assessing mudflow risk.: Due to accurate, proprietary and practical data, they allow stakeholders to minimize damage and save people's lives. The integration of IoT, remote sensing and AI technologies into emergency management systems is an important step towards smart and secure communities. Based on the results of the review, the following strategic recommendations were formulated.

Political integration. It is advisable for States to officially include automated monitoring systems in national strategies to ensure national security and mitigate the effects of natural disasters; this will strengthen their legal framework and coordinate the activities of all structures [10].

Capacity building. For the effective use of automated systems, it is necessary to organize regular training events for local authorities and the population: knowing how to act in case of a threat to the village directly allows saving lives [9].

The financing model. Attracting international grants, investments, and public-private partnership projects is of great importance for infrastructure expansion: these funds allow the creation of sensors, drones, data centers, and on-site technical support systems [10].

Standards of flexibility. To facilitate data exchange between organizations, it is necessary to introduce a single data format and exchange protocols; integration of hydrometeorological data with GIS platforms significantly improves forecast accuracy [8].

Public engagement. Information should be disseminated through mobile applications, SMS, and social networks to temporarily warn the population about mudflow hazards and develop safety skills; thus, not only government agencies, but also citizens themselves will be involved in monitoring [9].

Pilot programs. It is advisable to implement special pilot projects taking into account the natural and geographical features of each region: for example, in mountainous mudflow-prone areas, the optimal solution is selected by checking automated radar sensors [5].

Support for scientific research. Simplification of engineering work and rapid integration of data analysis are achieved through the expansion and effective application of research in this area; the creation of analytical models based on AI can expand the possibilities of predicting mudflows in the future [6].

References

1. Zhdanov V.V. et al. Spatiotemporal distribution of meteorological conditions for mudflow formation in the mountains of southern Kazakhstan // Hydrometeorology and Ecology. – 2026. – No. 2 (122). – P. 75–89.
2. Webster E.G. et al. Space-use patterns of green turtles in industrial coastal foraging habitat: Challenges and opportunities for informing management with a large satellite tracking dataset // Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems. – 2022. – Vol. 32. – P. 1041–1056.
3. Vojtek M., Vojteková J. Fluvial flood inundation modeling: a comparative assessment of 1D and 2D hydraulic approach using MIKE+ // Water Resources Management. – 2026. – Vol. 40.
4. Ringo J., Sabai S., Mahenge A. Performance of early warning systems in mitigating flood effects. A review // Journal of African Earth Sciences. – 2024. – Vol. 210.
5. Bonneau J. et al. The impact of stormwater management strategies on the flow regime of a peri-urban catchment facing urbanisation and climate change: a distributed modelling study in Lyon, France // Urban Water Journal. – 2023. – Vol. 20. – P. 925–942.
6. Kumar V. et al. The state of the art in deep learning applications, challenges, and future prospects: A comprehensive review of flood forecasting and management // Sustainability. – 2023. – Vol. 15.
7. Tang M. et al. Coupling distributed hydrological model with spatially discrete altimetry data for distributed prediction in ungauged basins // Journal of Hydrology. – 2025.
8. Latif S.D. et al. Novel advances in real-time pluvial flash flood forecasting under climate change through combination of various machine learning models // Theoretical and Applied Climatology. – 2026. – Vol. 157.
9. Popov N.V. et al. Quantitative assessment of glacial mudflow hazard in the Ile Alatau // Geography and Water Resources. – 2024. – No. 4. – P. 115–129.
10. Lee J. et al. Effect of mountainous rainfall on uncertainty in flood model parameter estimation // Hydrology Research. – 2024. – Vol. 55. – P. 221–236.

Received: 10.10.2026
Accepted: 16.10.2026
Published: 28.10.2026

УДК 556.16

DOI: 10.32743/UniTech.2026.151.10.23569

Seasonal and spatial variability of monthly discharge along the Yevlakh–Zardab–Surra reach of the Kura river (2021–2025)

Huseynov Habil Akram
Doctoral student, Lecturer
Military Department
Azerbaijan State Oil and Industry University
Academy of the Ministry of Emergency Situations
Azerbaijan, Baku

Сезонная и пространственная изменчивость среднемесячного расхода воды на участке реки Куры Евлах–Зердаб–Сурра (2021–2025 гг.)

Гусейнов Хабил Акрам оглы
докторант, преподаватель военной кафедры, Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности; Академия МЧС Азербайджана
Азербайджанская Республика, г. Баку

Abstract

This study quantifies seasonal discharge patterns and spatial differences at three Kura River gauges during 2021–2025, using 180 reported monthly mean discharges at Yevlakh, Zardab and Surra. Annual and seasonal means were weighted by calendar days; calendar-month profiles and concurrent interstation differences were calculated. Daily records for 2022–2024 supported an internal consistency check and sensitivity analysis. Five-year weighted means were 152.21, 189.61 and 170.35 m³/s, respectively. All three five-year monthly profiles peaked in May, whereas pooled seasonal means peaked in summer at Yevlakh and spring at Zardab and Surra. Zardab exceeded Yevlakh in 52 of 60 months; Surra was below Zardab in 46 months. Replacing checked values with daily-derived means changed five-year station means by less than 0.08 %. The findings provide a recent observational baseline for coordinated monitoring and seasonal water-management assessment. Net spatial contrasts do not identify individual withdrawal or tributary contributions. The short record and monthly means cannot establish long-term trends or flood peaks.

Библиографическое описание: Гусейнов Х.А. оглы Сезонная и пространственная изменчивость среднемесячного расхода воды на участке реки Куры Евлах–Зердаб–Сурра (2021–2025 гг.) // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23569

For citation: Huseynov H.A. Seasonal and spatial variability of monthly discharge along // Universum: Technical Sciences : electronic scientific journal. 2026. No. 10(151). Available at: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23569

Аннотация

Цель исследования — количественно охарактеризовать сезонные особенности расходов воды и различия между тремя гидрологическими постами реки Куры за 2021–2025 гг. Проанализированы 180 среднемесячных значений расхода воды на постах Евлах, Зердаб и Сурра. Среднегодовые, сезонные и средние за весь период расходы рассчитаны с учётом числа календарных дней в каждом месяце. Дополнительно определены средние значения для одноимённых месяцев пяти лет и разности расходов между постами за одинаковые месяцы. Суточные данные за 2022–2024 гг. использованы для проверки внутренней согласованности и анализа чувствительности результатов. Средние расходы за весь период составили соответственно 152,21, 189,61 и 170,35 м³/с. Максимум средних значений для календарных месяцев на всех постах пришёлся на май. При группировке по трёхмесячным сезонам наибольший расход отмечен летом в Евлахе и весной в Зердабе и Сурре. Расход в Зердабе превышал расход в Евлахе в 52 из 60 месяцев; в Сурре он был ниже, чем в Зердабе, в 46 месяцах. Замена проверенных месячных значений средними, рассчитанными по суточным данным, изменила средние расходы за пять лет менее чем на 0,08 %. Результаты формируют наблюдательную основу для согласованного мониторинга и сезонного управления водными ресурсами. Межпостовые различия не рассматриваются как непосредственные оценки водозабора или притока. Краткость ряда и месячный шаг данных ограничивают выводы о долговременных тенденциях и пиковых расходах воды.

Keywords: Kura River, monthly discharge, seasonality, spatial variability, gauging stations, hydrological monitoring.

Ключевые слова: река Кура, среднемесячный расход воды, сезонность, пространственная изменчивость, гидрологические посты, гидрологический мониторинг.

Introduction

The timing and magnitude of river discharge are essential components of the flow regime [8]. Seasonal analysis complements annual averages because human interventions can redistribute flows within the year [3, 10]. In a regulated river network, the interpretation of an individual gauge also depends on upstream conditions and intervening tributaries [9].

For the Kura basin, published work addresses water-withdrawal management [1], regional flood conditions [7] and long historical streamflow variability [2]. The present study adds a common-period comparison of recent observations at Yevlakh, Zardab and Surra. Its objective is to quantify annual differences, identify the seasonal discharge pattern at each station and determine the direction and persistence of concurrent interstation contrasts during 2021–2025.

Materials and methods

The analysis uses the monthly discharge compilation supplied for the author’*s* doctoral research within the hydrological and operational dataset of the Azerbaijan State Water Resources Agency. The three stations are ordered downstream as Yevlakh, Zardab and Surra. Zardab lies

upstream of the Kura–Araz confluence and Surra downstream [4, pp. 19–20]. The analysis therefore compares observed station conditions, including the part of the river influenced by the Araz, rather than a reservoir-release series.

The designated monthly-summary sheet contains 60 monthly mean discharges per station, January 2021–December 2025: 180 complete, positive values in m³/s. Stage observations in centimetres were excluded. No monthly values were interpolated or selectively corrected. Calendar-day records for 2022–2024 allowed 108 station-month means to be recomputed, excluding ten-day summary rows and noncalendar entries. In 104 comparisons, absolute differences did not exceed 0.5 m³/s; the largest was 2.74 m³/s (1.19 %). The supplied monthly series was retained consistently, and the daily-derived alternative was used only for sensitivity analysis. Daily records for 2021 and 2025 were unavailable in the compilation.

Descriptive analysis follows standard hydrological statistical principles [5]. Annual, seasonal and full-period mean discharges were weighted by the number of calendar days using equation (1):

$$\overline{Q}_{s,T} = \frac{\sum_{t \in T} d_t Q_{s,t}}{\sum_{t \in T} d_t} \quad (1)$$

Here $\overline{Q}_{s,T}$ is the day-weighted mean; $Q_{s,t}$ is the reported monthly mean at station s in month-year t, d_t is the number of days in that month, and T is the set of months being averaged. The complete period contains 1,826 days, including 29 days in February 2024. Seasons are December–February, March–May, June–August and September–November. Each seasonal statistic pools the corresponding months from all five calendar years; the winter group does not represent five consecutive complete winters.

The calendar-month profile gives equal weight to each year and was calculated using equation (2):

$$C_{s,m} = \frac{1}{5} \sum_{y=2021}^{2025} Q_{s,y,m} \quad (2)$$

Here $C_{s,m}$ is the mean for calendar month m, and $Q_{s,y,m}$ is its reported discharge in year y. Spatial contrasts were computed as downstream minus upstream discharge for each of the 60 concurrent months. Their reported averages give equal weight to each month. These contrasts are not travel-time-adjusted water balances.

Results and discussion

Annual means increased markedly in 2024 relative to 2021–2023, but the change from 2024 to 2025 differed among stations (Table 1). Yevlakh increased by 13.89 %, Zardab by 0.62 %, while Surra decreased by 7.63 %. Thus, a similar recent period did not produce the same year-to-year response along the river.

Table 1. Calendar-day-weighted mean discharge (m³/s)

Period	Yevlakh	Zardab	Surra
2021	97.32	106.34	99.30
2022	124.88	143.02	115.19
2023	116.80	139.91	134.49
2024	197.27	278.41	261.23
2025	224.67	280.13	241.32
2021–2025	**152.21**	**189.61**	**170.35**

The monthly chronology (Figure 1) shows substantial variation in both magnitude and timing. In 2023 the highest monthly mean occurred in August at Yevlakh and September at Zardab and Surra. In May 2025 all three stations reached their respective study-period maxima: 404.00, 455.00 and 423.00 m³/s. These values are monthly means and must not be interpreted as instantaneous flood peaks.

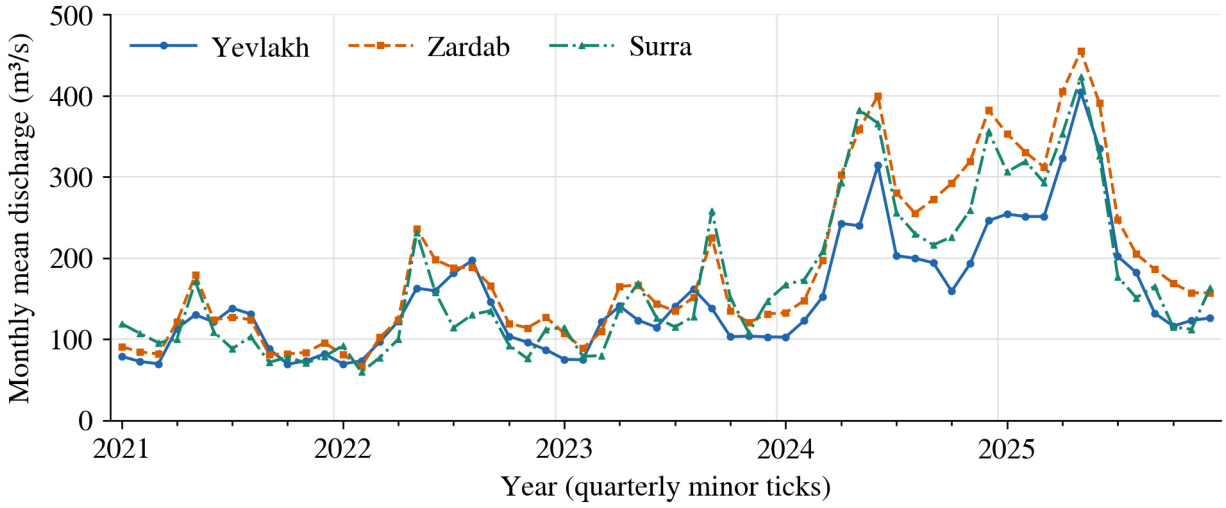


Figure 1. Monthly mean discharge at the three stations (2021–2025)

The five-year calendar-month profiles all peak in May: 211.93 m³/s at Yevlakh, 279.08 m³/s at Zardab and 275.20 m³/s at Surra (Figure 2). Their minima occur in different months: October at Yevlakh (110.11 m³/s), February at Zardab (143.32 m³/s) and November at Surra (125.12 m³/s). The resulting maximum-to-minimum ratios are 1.92, 1.95 and 2.20. These are ratios within the five-year mean monthly profiles, not ratios of individual extreme observations.

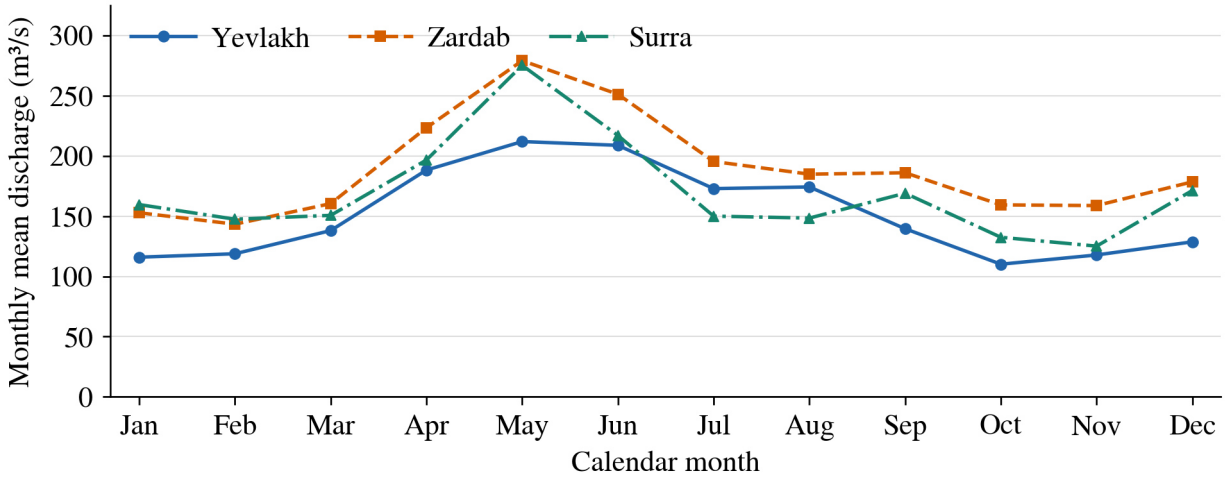


Figure 2. Calendar-month profiles; each point is the arithmetic mean of five monthly observations (2021–2025)

A common May maximum does not imply identical three-month seasonality. At Yevlakh, the June–August weighted mean is 185.04 m³/s, slightly above the March–May mean of 179.32 m³/s. At Zardab and Surra, spring has the highest seasonal means, 220.92 and 207.61 m³/s, compared with summer values of 210.03 and 171.32 m³/s. The distinction reflects the contribution of all three months to a seasonal average, rather than the month of the profile maximum alone.

Zardab discharge exceeds Yevlakh discharge in 52 of 60 months; the equal-month mean difference is +37.34 m³/s. Surra is below Zardab in 46 months, with a mean difference of −19.19 m³/s. The full-period weighted station means likewise place Zardab above Surra and Yevlakh (Table 1). Discharge therefore does not increase monotonically downstream in this compilation, despite Surra’*s* position below the Araz confluence.

These differences describe the net observed contrast between gauges. Tributary inflows, withdrawals, return flows, channel or floodplain storage, routing and measurement uncertainty cannot be separated with the available monthly series. Historical Kura assessments document regulation and seasonal redistribution [4], while wider studies demonstrate the importance of network context [9]. Neither source establishes the cause of the specific 2021–2025 contrasts. In particular, a negative Surra–Zardab difference is not a direct estimate of water loss or abstraction.

Internal data checks support the stability of the broad findings. Replacing all 108 checked values with calendar-day means changed the five-year weighted means by +0.028 % at Yevlakh, +0.057 % at Zardab and +0.072 % at Surra. Profile maximum and minimum months remained unchanged. This is a consistency assessment within the supplied compilation, not independent validation of gauge accuracy; rating-curve metadata and measurement uncertainties were unavailable.

The five-year record describes recent conditions rather than a climatological normal. Record length requirements depend on the hydrological statistic being estimated [6]; no long-term trend test, climate attribution or flood-frequency calculation is attempted here. Extending the synchronized records and adding tributary, withdrawal and reservoir-operation data would permit a more complete interpretation. The present comparison can support the coordinated monitoring emphasized in basin-management research [11].

Conclusion

The 2021–2025 observations identify a common May maximum in the three calendar-month profiles, alongside a summer seasonal maximum at Yevlakh and spring maxima at Zardab and Surra. Discharge was usually higher at Zardab than at Yevlakh and lower at Surra than at Zardab. These findings remain stable under the available daily-data sensitivity check. They provide a recent baseline for station-specific seasonal monitoring, while identifying the additional water-balance and measurement information needed to explain interstation differences.

References

1. Abbasov R.K., Smakhtin V.U. Introducing environmental thresholds into water withdrawal management of mountain streams in the Kura River basin, Azerbaijan // Hydrological Sciences Journal. – 2009. – Vol. 54, No. 6. – P. 1068–1078. – DOI: 10.1623/hysj.54.6.1068.
2. Bakhtiyorov Z., Chen F., Chen Y. et al. Historical drivers and future streamflow variations of the Kura River in the Western Transcaucasia region of Georgia: Analysis of tree-ring chronologies from 1720 to 2021 CE // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. – 2024. – Vol. 655. – Art. 112529. – DOI: 10.1016/j.palaeo.2024.112529.
3. Chalise D.R., Sankarasubramanian A., Olden J.D., Ruhi A. Spectral signatures of flow regime alteration by dams across the United States // Earth's Future. – 2023. – Vol. 11, No. 2. – DOI: 10.1029/2022EF003078.
4. Hannan T., Leummens H.J.L., Matthews M.M. Desk study – Hydrology. UNDP/GEF project "Reducing transboundary degradation in the Kura Ara(k)s river basin". – Tbilisi–Baku–Yerevan [Электронный ресурс]. – 2013. – 29 P. – URL: https://iwlearn.net/resolveuid/0e382495579e4e16822cf70cadc440c7 (accessed: 09.10.2026).
5. Helsel D.R., Hirsch R.M., Ryberg K.R., Archfield S.A., Gilroy E.J. Statistical methods in water resources. U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 4, chapter A3. – Reston, VA: U.S. Geological Survey. – 2020. – 458 P. – DOI: 10.3133/tm4a3.
6. Huh S., Dickey D.A., Meador M.R., Ruhl K.E. Temporal analysis of the frequency and duration of low and high streamflow: Years of record needed to characterize streamflow variability // Journal of Hydrology. – 2005. – Vol. 310, No. 1–4. – P. 78–94. – DOI: 10.1016/j.jhydrol.2004.12.008.
7. Huseynov H.A., Safarov S.H. Causes and characteristics of possible flood occasions in the Yevlax-Neftchala zone along the Kura River basin // Herald of Azerbaijan Engineering Academy. – 2024. – Vol. 16, No. 3. – P. 120–127. – DOI: 10.52171/2076-0515_2024_16_03_120_127.
8. Poff N.L., Allan J.D., Bain M.B. et al. The natural flow regime: A paradigm for river conservation and restoration // BioScience. – 1997. – Vol. 47, No. 11. – P. 769–784. – DOI: 10.2307/1313099.
9. Ruhi A., Hwang J., Devineni N. et al. How does flow alteration propagate across a large, highly regulated basin? Dam attributes, network context, and implications for biodiversity // Earth's Future. – 2022. – Vol. 10, No. 6. – DOI: 10.1029/2021EF002490.

10. Singh N.K., Basu N.B. The human factor in seasonal streamflows across natural and managed watersheds of North America // Nature Sustainability. – 2022. – Vol. 5, No. 5. – P. 397–405. – DOI: 10.1038/s41893-022-00848-1.
11. Suleymanov F. The institutionalization of the Kura-Aras River Basin for effective management of water resources // International Journal of River Basin Management. – 2025. – Vol. 23, No. 4. – P. 675–685. – DOI: 10.1080/15715124.2024.2363310.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК

UNIVERSUM: ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Электронный научный журнал

№ 10(151)
Октябрь 2026 г.

Свидетельство о регистрации СМИ: ЭЛ № ФС 77 – 54434 от 17.06.2013

Мнение авторов может не совпадать с позицией редакции.

Издание содержит научную информацию и в соответствии с ч. 4 ст. 1 Федерального закона от 29.12.2010 № 436-ФЗ «О защите детей от информации, причиняющей вред их здоровью и развитию» не подлежит классификации (маркировке) по возрастным категориям

Издательство ООО «Юниверсум»

Объём издания: 772 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: 28.10.2026

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)