

9(150)

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Александрович Попов (1821, Санкт-Петербург — 1898, Санкт-Петербург) — русский флотоводец, кораблестроитель, адмирал (1891 год). Его имя носит корабль Черноморского флота — эскадренный миноносец «Попов» рядом с Владивостоком. Родился 22 сентября (4 октября) 1821 года в Санкт-Петербурге в семье известного кораблестроителя, управляющего Охтинской верфью Александра Андреевича Попова.

С 1830 года учился на морском отделении Александровского корпуса; в 1838 году окончил Морской кадетский корпус с присвоением чина мичмана и зачислением в 32-й флотский экипаж (Черноморский флот).

был командиром парохода «Метеор» (вспомогательного крейсера Черноморского флота). В 1853 году был командирован в Константинополь для сбора сведений о вооружении Босфора и близлежащих к нему укрепленных мест по Чёрному морю и Дунаю до Рущука. Участвовал в Крымской кампании. В 1853—1854 годах командовал пароходами «Эльбрус», «Андия», «Турок», потопил шесть турецких транспортов; в сентябре 1854 года командовал в чине капитан-лейтенанта пароходом «Тамань», прорвался из блокированного Севастополя в Одессу и вернулся обратно с грузом для оборонявшихся.

Руководил установкой морских орудий на укреплениях Севастополя и артиллерийским снабжением. Руководил снаряжением двух брандеров. Руководил созданием бона для преграждения севастопольского рейда. За боевые заслуги в этот период — награждён двумя орденами.

Произведен в капитаны 1-го ранга; с 1855 — флигель-адъютант. В 1855 году был командирован с театра военных действий в Кронштадт, Выборг, Свеаборг и другие укрепленные порты побережья Балтийского моря. В период 1856—1858 годов был начальником штаба Кронштадтского порта.

В 1858—1861 гг. — командующий отрядом из двух корветов («Рында» и «Гридень») и клипера «Офрингем» (2-й Амурский отряд), привел его из Кронштадта в Японское море, затем ходил у берегов Японии, исследовал побережья русского Приморья (одна из заливов — у 45-й параллели — был назван в честь корвета Попова «Рында»). В 1859 году кораблями отряда командованием нанесли визит в порт Сан-Франциско.

В 1861 году был произведен в контр-адмиралы с назначением в Свиту[2]. Избран членом Комитета Кораблестроительного и Морского Училищ, членом Комитета о переделке парусных судов. Совершил плавание к берегам Японии. В 1861 года был назначен командиром отряда судов Балтийского флота (Первая эскадра). В 1862 году был произведен в вице-адмиралы с назначением в Свиту. В 1863 году был назначен командиром отряда судов Балтийского флота (Вторая эскадра).

205 ЛЕТ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ
21 сентября 2026 г.

ПОПОВ
АНДРЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ
1821-1898 гг.



UNIVERSUM: ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Научный журнал

Издается ежемесячно с ноября 2013 года

Выпуск: 9(150)

Сентябрь 2026 г.

Часть 5

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.;

Кокишаров 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. — № 9(150). — Часть 5. — Новосибирск : Изд-во «Юниверсум», 2026. — 100 с. — Текст : электронный. — URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/category/9150> (дата публикации: 28.09.2026).

ISSN 2311-5122

DOI: 10.32743/UniTech.2026.150.9

Учредитель и издатель: ООО «Юниверсум»

© ООО «Юниверсум», 2026 г.

Содержание

Статьи на русском языке

Промышленность и производство

Технология продовольственных продуктов и пищевая промышленность

- Белково-жировая эмульсия: материальный баланс и технологическая проверка в замороженных мясных полуфабрикатах с соевыми белками** 4

Абдуллаева Буфотима Турсунали кизи

Солиев Махаммаджон Исматуллаевич

Нурмонов Сувонкул Эрхонович

- Определение содержания глицирризиновой кислоты и общих флавоноидов в корнях солодки (*Glycyrrhiza glabra* L.), полученных из некоторых регионов Узбекистана** 13

Мадрахимова Муаззам Кенжа кизи

Машарипова Зулхумар Атабековна

- Моделирование процесса выпаривания хлопковой мисцеллы в трубчатых аппаратах с восходящей пленкой жидкости** 28

Хамдамов Музаффар Бердикулович

Худойбердиев Абдукарим Абсаломович

Худайбердиев Абсалом Абдурасулович

Хамдамов Анвар Махмудович

- Оптимизация состава функционального напитка целевого назначения на основе морковного сока и настоев из лекарственного растительного сырья** 43

Ҳабибуллаев Назаржон Акрамович

Амонова Зубайда Мукимовна

Инфраструктура и транспорт

Строительство, архитектура и жилищно-коммунальное хозяйство

- Связь деревянной архитектуры, древнерусских мер длины и концепции «Витрувианского человека»: историко-архитектурный анализ** 58

Редин Алексей Сергеевич

- Анализ растекаемости, средняя плотность и прочностные свойства пенобетона** 68

Сатторов Зафар Мурадович

Отажонов Олмосбек Аскарали угли

Умирдинов Ихтиёржон Олимжон угли

Мадраймов Нийетбай Амангелдиевич

- Оптимизация состава и повышение водостойкости магнезиального оксихлоридного цемента на основе доломита Джамансайского и метакаолина Хужакульского месторождений** 80

Туремуратов Шарибай Науризбаевич

Сайпов Абат Азатович

Абылова Амина Жанабаевна

Бекбосынова Рысгул Жиёмуратовна

Абылов Женис Жанабаевич

Мнажов Аманияз Ниетбаевич

Транспорт и транспортные системы

- Анализ факторов, влияющих на эксплуатационную надёжность зубчатых передач редуктора электромобиля** 95

Нусратова Нигина Рустамовна

Ишмуратов Хикмат Кахарович

СТАТЬИ НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ

ПРОМЫШЛЕННОСТЬ И ПРОИЗВОДСТВО

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОДОВОЛЬСТВЕННЫХ ПРОДУКТОВ И
ПИЩЕВАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

Статья поступила в редакцию: 25.08.2026

Статья принята к публикации: 30.08.2026

Статья опубликована: 28.09.2026

УДК 664.9+664.6

Белково-жировая эмульсия: материальный баланс и технологическая проверка в замороженных мясных полуфабрикатах с соевыми белками

Абдуллаева Буфотима Турсунали кизи

PhD, преподаватель

кафедры технологии пищевых продуктов, Наманганский государственный технический университет

Республика Узбекистан, г. Наманган

E-mail: muhammadbey@mail.ru

Солиев Махаммаджон Исматуллаевич

PhD, проф.

кафедры химии, Наманганский государственный технический университет

Республика Узбекистан, Наманган

Нурмонов Сувонкул Эрхонович

DSc, проф.

кафедры органической и нефтегазовой химии, Национальный университет Узбекистана

Республика Узбекистан, г. Ташкент

Библиографическое описание: Абдуллаева Б.Т. кизи, Солиев М.И., Нурмонов С.Э. Белково-жировая эмульсия: материальный баланс и технологическая проверка в замороженных мясных полуфабрикатах с соевыми белками // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 9(150). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23358>

Protein–fat emulsion: mass balance and technological verification in frozen meat semi-finished products with soy proteins

Abdullaeva Bufotima

PhD, Lecturer

*Department of Food Technology, Namangan State Technical University
Uzbekistan, Namangan*

Soliev Makhammadjon

PhD, Professor

*Department of Chemistry, Namangan State Technical University
Uzbekistan, Namangan*

Nurmonov Suvonkul

DSc, Professor

*Department of Organic and Oil-Gas Chemistry, National University of Uzbekistan
Uzbekistan, Tashkent*

Аннотация

Цель работы — уточнить материальный баланс белково-жировой эмульсии и распределение воды, а также проверить применимость выбранной рецептуры в производственных условиях. Исследование выполнено для партии замороженных рубленых полуфабрикатов массой 100 кг. Эмульсию получали из 8 кг животного жира, 8 кг воды и 2 кг соевого изолята (4:4:1); 6 кг текстурированного белка отдельно гидратировали в 15 кг воды. Массы эмульсии и гидратированного текстурата составили 18 и 21 кг. Из 23,5 кг добавленной воды 34,04 % приходилось на эмульсию, 63,83 % — на текстурат, 2,13 % — на технологический резерв. При суммарном учете потерь выход равнялся 98,1 кг, при последовательном — 98,114 кг. В производственной проверке после куттерования не наблюдали видимого отделения воды или жира. При оценке по методу Грау–Хамма доля свободной влаги непосредственно после изготовления не превышала 2 %, а органолептическая оценка приготовленных изделий сразу после изготовления и после 30 суток хранения при температуре не выше –18 °С соответствовала категориям «хорошо» и «отлично». Расчетное сопоставление четырех соотношений подтвердило, что только 4:4:1 точно воспроизводит заданные массы жира, воды и изолята в 18 кг эмульсии. Инструментальная стабильность эмульсии, ТРА, потери при дефростации и тепловой обработке не определялись; поэтому выводы ограничены материальным балансом и технологической проверкой конкретной рецептуры.

Abstract

The study clarified the mass balance of a protein–fat emulsion and the allocation of added water and verified the selected formulation under production conditions. A 100 kg batch of frozen minced meat semi-finished products was used. The emulsion contained 8 kg of animal fat, 8 kg of water and 2 kg of soy protein isolate (4:4:1), while 6 kg of textured soy protein was separately hydrated with 15 kg of water. The emulsion and hydrated textured-protein phases weighed 18 and 21 kg, respectively. Of the 23.5 kg of added water, 34.04 % was assigned to the emulsion, 63.83 % to the textured protein and 2.13 % to a processing allowance. Additive loss accounting gave a yield of 98.1 kg, whereas sequential accounting gave 98.114 kg. No visible separation of water or fat was

observed after bowl chopping during production verification. Grau–Hamm pressing showed no more than 2 % free moisture immediately after production. The cooked products were rated good or excellent immediately after production and after 30 days of storage at no higher than -18°C . A calculation-based comparison of four fat:water:isolate ratios showed that only 4:4:1 reproduced the specified ingredient masses in an 18 kg emulsion. Instrumental emulsion stability, texture-profile analysis, thawing loss and cooking loss were not measured; the conclusions are therefore limited to the mass balance and technological verification of this formulation.

Ключевые слова: мясные полуфабрикаты, соевый белковый изолят, текстурированный соевый белок, белково-жировая эмульсия, материальный баланс, влагоудерживающая способность, органолептическая оценка.

Keywords: meat semi-finished products, soy protein isolate, textured soy protein, protein–fat emulsion, mass balance, water-holding capacity, sensory evaluation.

Введение

Соевый изолят и текстурированный соевый белок выполняют в мясной системе разные технологические функции. Изолят участвует в формировании межфазного слоя белково-жировой эмульсии, тогда как текстурат после отдельной гидратации входит в структуру фарша. Свойства соевых эмульсионных систем изучены в модельных гелях и мясных продуктах [6–11], однако сами по себе известные коэффициенты гидратации не решают производственную задачу закрытого материального баланса. При одновременном использовании двух белковых компонентов возникает риск повторного учета воды: один и тот же поток может быть записан и как самостоятельный ингредиент, и как часть предварительно приготовленной фазы. Научно-практическая задача настоящей работы состоит в связывании фазового баланса конкретной рецептуры с результатами ее производственной проверки, а не в заявлении универсальной оптимальности известного соотношения 4:4:1.

Цель работы — составить закрытый материальный баланс 100 кг рецептуры замороженных рубленых полуфабрикатов с двумя видами соевого белка, сопоставить аддитивный и последовательный учет технологических потерь, расчетно проверить чувствительность состава 18 кг эмульсии к изменению соотношения жир:вода:изолят и оценить применимость выбранной схемы по производственным наблюдениям, влагоудерживающей способности и органолептическим показателям готовых изделий.

Материалы и методы

Исследована производственная рецептура рубленых полуфабрикатов из говядины с животным жиром, соевым изолятом и текстуратом. На партию массой 100 кг приходилось по 25,0 кг говядины II сорта и жирной говядины, 8,0 кг животного жира, 23,5 кг добавленной воды, 2,0 кг изолята, 6,0 кг текстурированного белка и 11,0 кг прочих компонентов. В более широком производственном испытании эта базовая рецептура без растительных функциональных добавок служила контрольным образцом; в настоящей статье приведены

только относящиеся к ней данные. Образец без соевых белков не готовили, поскольку исследование не было спланировано как оценка эффективности замены мясного сырья соевыми компонентами.

Изолят соединяли с холодной водой, после его гидратации вводили измельченный животный жир и обрабатывали смесь в куттере 4 мин при 4500 об/мин. Текстура готовили отдельно при соотношении белок:вода 1:2,5. Фазы смешивали с мясным сырьем 3–4 мин, изделия массой 50 г формовали при температуре фарша не выше -1°C и замораживали при $-38\ldots-46^{\circ}\text{C}$ до температуры в центре не выше -18°C . Операционную однородность эмульсии оценивали по отсутствию видимого отделения свободной воды или жира после куттерования и при смешивании с фаршем.

Влагоудерживающую способность базового полуфабриката оценивали прессованием по методу Грау–Хамма и выражали через долю отделившейся свободной влаги. Органолептическую оценку изделий после тепловой обработки проводили в соответствии с ГОСТ 9959 – 2015 [3] сразу после изготовления и после 30 суток хранения при температуре не выше -18°C ; учитывали внешний вид, аромат, вкус, консистенцию и сочность. Потери при дефростации и тепловой обработке, инструментальную стабильность эмульсии, размер частиц, реологические характеристики и текстурно-профильный анализ (ТРА) в исходном эксперименте не определяли.

Материальный баланс рассчитывали для исходной партии 100 кг. При аддитивной схеме потери всех операций суммировали относительно исходной массы; при последовательной схеме каждую следующую норму применяли к массе, оставшейся после предыдущей операции. Для расчетной проверки соотношения жир:вода:изолят массу эмульсии фиксировали на уровне 18 кг и сопоставляли варианты 3:4:1, 4:4:1, 4:3:1 и 5:4:1. Сопоставление носило расчетный, а не экспериментальный характер. Поскольку количественные результаты получены в рамках описательной производственной проверки без серии независимых повторных партий, для них не рассчитывали стандартные отклонения, доверительные интервалы и р-значения.

Результаты и обсуждение

Для приготовления эмульсии жир, воду и изолят брали в массовом соотношении 4:4:1: $8,0 + 8,0 + 2,0 = 18,0$ кг. Жир и вода составляли по 44,44 % этой массы, изолят — 11,11 %. Текстура гидратировали отдельно в соотношении 1:2,5; из 6,0 кг сухого продукта и 15,0 кг воды получали 21,0 кг белковой фазы. Таким образом, предварительно подготовленные эмульсионная и текстуратная фазы вместе составляли 39,0 % рецептуры. Распределение сырья показано в таблице 1.

Таблица 1.

Материальный баланс технологических фаз для партии 100 кг

Фаза	Компоненты и их масса, кг	Масса, кг
Мясное сырье	Говядина II сорта — 25,0; жирная говядина — 25,0	50,0
Белково-жировая эмульсия	Животный жир — 8,0; вода — 8,0; соевый изолят — 2,0	18,0
Гидратированный текстура	Текстурированный соевый белок — 6,0; вода — 15,0	21,0

Фаза	Компоненты и их масса, кг	Масса, кг
Прочие компоненты	Сухари — 5,0; лук — 3,7; соль — 1,0; перец — 0,3; Е621 — 0,2; фосфаты — 0,3; вода — 0,5	11,0
Итого	Материальный баланс рецептуры	100,0

Из 23,5 кг добавленной воды 8,0 кг использовали при приготовлении эмульсии, 15,0 кг — при гидратации текстурата, а 0,5 кг составляли технологический резерв. Доли этих потоков равнялись 34,04; 63,83 и 2,13 % соответственно. Это распределение относится только к добавленной воде и не характеризует общую влажность продукта. Разделение потоков исключает повторный учет воды в составе разных технологических фаз.

Эмульсию готовили 4 мин в куттере при 4500 об/мин, добавляя измельченный жир к предварительно гидратированному изоляту. После куттерования и при последующем смешивании с фаршем видимого отделения свободной воды или жира не наблюдали. Этот результат подтверждает операционную однородность смеси в условиях примененной линии, но не заменяет центрифужный тест, реологические измерения или анализ размера капель. Параметры остальных операций приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Параметры подготовки и переработки сырья

Операция	Технологический параметр
Подготовка мяса	От –6 до –8 °С; отверстия решетки 8–12 мм
Белковые фазы	Текстурат : вода = 1:2,5; эмульсия — 4:4:1
Куттерование	4500 об/мин, 4 мин; смешивание 3–4 мин
Формование	Не выше –1 °С; 0,5–1,0 МПа; масса 50 г
Замораживание	От –38 до –46 °С; центр изделия не выше –18 °С

Потери при измельчении мяса приняли равными 0,2 %, приготовлении эмульсии — 0,5 %, смешивании — 0,5 %, формовании — 0,2 %, замораживании — 0,5 %. При аддитивном учете суммарные потери составили 1,9 %, а выход — 98,1 кг. Последовательное применение тех же норм дало 98,114 кг, то есть на 0,014 кг больше; для партии 100 кг различие между способами учета практически не влияет на целое число изделий и соответствует 1962 изделиям массой 50 г. Нормы потерь использованы как производственные значения, а не как результаты повторного лабораторного определения.

Полученная схема согласуется с представлениями о роли соевого изолята в белково-жировых дисперсиях [6–11]: изолят формирует эмульсионную фазу, а текстурат после гидратации выполняет структурообразующую функцию в фарше. Вместе с тем соотношение 4:4:1 следует рассматривать как рабочее для данной рецептуры и примененного оборудования. Оно не доказывает физико-химического превосходства над другими вариантами без прямого инструментального сравнения.

Расчетная проверка соотношения 4:4:1

При фиксированной массе эмульсии 18 кг изменение числа частей неизбежно меняет расход каждого ингредиента. Расчетные варианты приведены в таблице 3; они использованы для проверки согласованности рецептуры, а не как результаты испытания стабильности эмульсии.

Таблица 3.

Расчетный состав 18 кг эмульсии при разных соотношениях компонентов

Жир:вода:изолят	Жир, кг	Вода, кг	Изолят, кг	Соответствие исходной рецептуре
3:4:1	6,75	9,00	2,25	Нет
4:4:1	8,00	8,00	2,00	Да
4:3:1	9,00	6,75	2,25	Нет
5:4:1	9,00	7,20	1,80	Нет

Только вариант 4:4:1 точно воспроизводит предусмотренные исходной рецептурой 8,0 кг жира, 8,0 кг воды и 2,0 кг изолята. Остальные варианты при той же массе эмульсии требуют изменения расхода минимум одного ингредиента и последующей корректировки общего баланса. Следовательно, расчет подтверждает согласованность выбранной схемы с рецептурой, но не является доказательством ее универсальной оптимальности.

Технологическая проверка и показатели качества

Ранее не включенные в рукопись результаты производственной проверки базового образца сведены в таблице 4. Они позволяют дополнить расчетный баланс фактическими наблюдениями, не приписывая работе не выполненные инструментальные испытания.

Таблица 4.

Результаты технологической проверки базовой рецептуры

Показатель	Метод и условия	Наблюдаемый результат
Операционная однородность эмульсии	Визуальный контроль после 4 мин куттерования и при смешивании	Видимое отделение свободной воды или жира не обнаружено
Влагоудерживающая способность	Прессование по Грау–Хамму непосредственно после изготовления	Доля отделившейся свободной влаги не превышала 2 %
Изменение свободной влаги при хранении	Повторная оценка по Грау–Хамму к концу наблюдения	Количество свободной влаги увеличилось на 1–2 процентных пункта
Органолептическая оценка приготовленных изделий	ГОСТ 9959-2015; сразу после изготовления и после 30 суток при ≤ -18 °C	Категории «хорошо» и «отлично»; мясной вкус и аромат, плотная консистенция и сочность

Совокупность этих данных показывает, что выбранная схема обеспечивала технологически однородную смесь, ограниченное отделение свободной влаги и приемлемые органолептические свойства готовых изделий в проверенных условиях. Эти показатели характеризуют работоспособность конкретной рецептуры, но не позволяют количественно сравнить ее с продуктом без соевых белков.

Ограничения исследования

В исходном плане отсутствовал продукт без соевых компонентов, поэтому работа не доказывает преимуществ соевого изолята и текстурата по сравнению с традиционной мясной рецептурой. Не определялись потери при дефростации и тепловой обработке, центрифужная стабильность эмульсии, реологические показатели и ТРА. Для прямого подтверждения влияния состава необходим отдельный эксперимент как минимум с контрольной рецептурой без соевых белков и вариантами 3:4:1, 4:4:1 и 5:4:1, выполненными в трех или более независимых партиях, с определением стабильности эмульсии, влагоудерживающей способности, потерь при размораживании и приготовлении, параметров ТРА и последующим дисперсионным анализом.

Заключение

Для партии массой 100 кг закрытый материальный баланс включает 18,0 кг белково-жировой эмульсии и 21,0 кг гидратированного текстурата; 23,5 кг добавленной воды распределены между эмульсией, текстуратом и технологическим резервом без повторного учета. Выход составляет 98,1 кг при аддитивном и 98,114 кг при последовательном расчете потерь. Соотношение 4:4:1 точно соответствует предусмотренным рецептурой массам жира, воды и изолята в 18 кг эмульсии. Производственная проверка показала отсутствие видимого расслоения, не более 2 % свободной влаги непосредственно после изготовления и приемлемую органолептическую оценку приготовленных изделий. Полученные результаты подтверждают применимость схемы для данной рецептуры и оборудования, но не устанавливают ее преимущества перед продуктом без соевых белков и не заменяют инструментальное исследование стабильности и текстуры.

Список литературы

1. Абдуллаева Б.Т., Солиев М.И. Scientific and statistical analysis of the production of semi-finished meat products in Uzbekistan // Научно-технический журнал Наманганского инженерно-технологического института. – 2021. – № 3 (47).
2. Атаходжаева И.Д., Акрамова Р.Р. Формирование рецептур белково-жировой эмульсионной системы функционального назначения на основе крольчатины для разработки нутрицевтических пищевых продуктов // Universum: технические науки. – 2025. – № 11 (140). – DOI: 10.32743/UniTech.2025.140.11.21254.
3. ГОСТ 9959–2015. Мясо и мясные продукты. Общие условия проведения органолептической оценки. – М.: Стандартинформ, 2016.

4. Джураева Н.Р., Жураева К.М. Применение льняного жмыха в технологии колбасных изделий для фортификации и замены соевого изолята // *Universum: технические науки*. – 2026. – № 5 (146). – DOI: 10.32743/UniTech.2026.146.5.22736.
5. Кузибеков С.К. и др. Исследование технологии получения соевого изолята из местных соевых бобов // *Universum: технические науки*. – 2025. – № 5 (134). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/20172>.
6. Bi C. et al. Acid-Mediated Formation of Soybean Isolate Protein Emulsion Gels with Soybean Oil as an Active Component // *Foods*. – 2023. – DOI: 10.3390/foods12091754.
7. Cai R. et al. Nano Filling Effect of Nonmeat Protein Emulsion on the Rheological Property of Myofibrillar Protein Gel // *Foods*. – 2022. – DOI: 10.3390/foods11050629.
8. Cui B. et al. Properties of soybean protein isolate/curdlan based emulsion gel for fat analogue: Comparison with pork backfat // *International Journal of Biological Macromolecules*. – 2022. – DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2022.02.157.
9. Zhang F. et al. Soy Protein-Based Emulsions: Application as Lipid Substitutes in Surimi Gels // *Foods*. – 2025. – DOI: 10.3390/foods14132342.
10. Zou Q. et al. Preparation of Cassia Bean Gum/Soy Protein Isolate Composite Matrix Emulsion Gel and Its Effect on the Stability of Meat Sausage // *Gels*. – 2024. – DOI: 10.3390/gels10100643.
11. Zou S. et al. Improving the Storage Stability of Soy Protein Isolate through Annealing // *Foods*. – 2024. – DOI: 10.3390/foods13040615.

References

1. Abdullaeva B.T., Soliev M.I. Scientific and statistical analysis of the production of semi-finished meat products in Uzbekistan // *Scientific and Technical Journal of Namangan Institute of Engineering and Technology*. – 2021.
2. Atakhodjaeva I.D., Akramova R.R. [Formation of recipes for a protein-fat emulsion system for functional purpose based on rabbit meat for the development of nutraceutical food products] // *Universum: tekhnicheskie nauki*. – 2025. – DOI: 10.32743/UniTech.2025.140.11.21254. (In Russ.)
3. GOST 9959–2015. Meat and meat products. General conditions for sensory evaluation. Moscow: Standartinform; 2016. – Moscow: Standartinform, 2016. (In Russ.)
4. Djurayeva N.R., Juraeva K.M. [Application of flaxseed press cake in sausage technology for fortification and replacement of soy protein isolate] // *Universum: tekhnicheskie nauki*. – 2026. – DOI: 10.32743/UniTech.2026.146.5.22736. (In Russ.)
5. Kuzibekov S.K. et al. [Research on the technology of obtaining soy isolate from local soybeans] // *Universum: tekhnicheskie nauki*. – 2025. – URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/20172> (дата обращения: 19.09.2026). (In Russ.)
6. Bi C. et al. Acid-Mediated Formation of Soybean Isolate Protein Emulsion Gels with Soybean Oil as an Active Component // *Foods*. – 2023. – DOI: 10.3390/foods12091754.

7. Cai R. et al. Nano Filling Effect of Nonmeat Protein Emulsion on the Rheological Property of Myofibrillar Protein Gel // Foods. – 2022. – DOI: 10.3390/foods11050629.
8. Cui B. et al. Properties of soybean protein isolate/curdlan based emulsion gel for fat analogue: Comparison with pork backfat // International Journal of Biological Macromolecules. – 2022. – DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2022.02.157.
9. Zhang F. et al. Soy Protein-Based Emulsions: Application as Lipid Substitutes in Surimi Gels // Foods. – 2025. – DOI: 10.3390/foods14132342.
10. Zou Q. et al. Preparation of Cassia Bean Gum/Soy Protein Isolate Composite Matrix Emulsion Gel and Its Effect on the Stability of Meat Sausage // Gels. – 2024. – DOI: 10.3390/gels10100643.
11. Zou S. et al. Improving the Storage Stability of Soy Protein Isolate through Annealing // Foods. – 2024. – DOI: 10.3390/foods13040615.

Статья поступила в редакцию: 07.08.2026

Статья принята к публикации: 04.09.2026

Статья опубликована: 28.09.2026

УДК 581.19+543.42

DOI: 10.32743/UniTech.2026.150.9.23380

**Определение содержания глицирризиновой кислоты и общих флавоноидов
в корнях солодки (*Glycyrrhiza glabra* L.), полученных из некоторых
регионов Узбекистана**

Мадрахимова Муаззам Кенжа кизи

докторант

Ташкентский химико-технологический институт

Республика Узбекистан, г. Ташкент

Машарипова Зулхумар Атабековна

доц. (PhD)

Ташкентский химико-технологический институт

Республика Узбекистан, г. Ташкент

E-mail: zulxumoratabekovna@gmail.com

**Determination of the content of glycyrrhizic acid and total flavonoids in licorice
(*Glycyrrhiza glabra* L.) roots obtained from selected regions of Uzbekistan**

Madrakhimova muazzam Kenja qizi

PhD doctoral student

Tashkent Institute of Chemical Technology

Republic of Uzbekistan, Tashkent

Masharipova Zulkhumar Atabekovna

Associate Professor, PhD

Tashkent Institute of Chemical Technology

Republic of Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

В данном исследовании сравнивалось содержание биологически активных веществ в корнях солодки (*Glycyrrhiza glabra* L.), собранных в Республике Каракалпакстан, Хорезмской и Джизакской областях Республики Узбекистан, а также изучалось влияние различных методов сушки на сохранение глицирризиновой кислоты и общего содержания флавоноидов. Целью исследования было выявление наиболее перспективного растительного материала и выбор оптимального метода сушки для последующего производства стандартизированных растительных экстрактов. Объектом исследования служили образцы корней солодки, собранные в Республике Каракалпакстан, Хорезмской и Джизакской областях. Содержание

Библиографическое описание: Мадрахимова М.К. кизи, Машарипова З.А. Определение содержания глицирризиновой кислоты и общих флавоноидов в корнях солодки (*Glycyrrhiza glabra* L.), полученных из некоторых регионов Узбекистана // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 9(150). URL: <https://universum.com/ru/tech/archive/item/23380>

глицирризиновой кислоты определяли методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ), а общее содержание флавоноидов — спектрофотометрически относительно рутина. Наибольшее содержание глицирризиновой кислоты ($6,14 \pm 0,18$ %) и общего количества флавоноидов ($4,25 \pm 0,15$ %) было обнаружено в образцах, собранных в Республике Каракалпакстан, которые были отобраны для дальнейших исследований. Сравнительная оценка различных методов сушки показала, что вакуумная сушка при 60 ± 5 °C обеспечивает максимальное сохранение биологически активных веществ и сокращает время сушки по сравнению с естественной сушкой. Эти результаты могут быть использованы при разработке технологий производства стандартизированных экстрактов и функциональных пищевых продуктов на основе корней солодки.

Abstract

In this study, the content of biologically active substances in licorice roots (*Glycyrrhiza glabra* L.) collected from the Republic of Karakalpakstan, Khorezm and Jizzakh regions of the Republic of Uzbekistan was compared and the effect of different drying methods on the preservation of glycyrrhizinic acid and total flavonoids was studied. The aim of the study was to identify the most promising plant material and select the optimal drying method for the subsequent production of standardized plant extracts. Licorice root samples collected from the Republic of Karakalpakstan, Khorezm and Jizzakh regions served as the object of study. The content of glycyrrhizinic acid was determined using high-performance liquid chromatography (HPLC), and the total flavonoid content was determined spectrophotometrically relative to rutin. The highest content of glycyrrhizinic acid (6.14 ± 0.18 %) and total flavonoids (4.25 ± 0.15 %) was found in the samples collected from the Republic of Karakalpakstan, which were selected for further studies. A comparative evaluation of different drying methods showed that vacuum drying at 60 ± 5 °C provides maximum preservation of biologically active substances and reduces drying time compared to natural drying. These results can be used in the development of technologies for the production of standardized extracts and functional food products based on licorice roots.

Ключевые слова: *Glycyrrhiza glabra* L., солодка, глицирризиновая кислота, флавоноиды, спектрофотометрия, сушка, экстракт.

Keywords: *Glycyrrhiza glabra* L., licorice, glycyrrhizin acid, flavonoid, spectrophotometry, drying, extract.

Введение

Солодка голая (*Glycyrrhiza glabra* L., семейство Fabaceae) является одним из наиболее ценных и широко используемых лекарственных растений в мировой фармацевтической, пищевой и косметической промышленности [23].

Солодка гладкая (*Glycyrrhiza glabra*), одно из лекарственных растений, представляет собой многолетнее растение, содержащее различные биологически активные соединения, такие как флавоноиды.

Промышленная ценность подземных органов *G. glabra* обусловлена богатым комплексом биологически активных веществ (БАВ), ключевыми среди которых являются тритерпеновые сапонины (в первую очередь глицирризиновая кислота) и фенольные

соединения (флавоноиды, изофлавоноиды и халконы) [5,27]. Глицирризиновая кислота (ГК) — специфический тритерпеновый гликозид, обладающий широким спектром фармакологической активности, включая противовирусное, противовоспалительное, гепатопротекторное и иммуно-модулирующее действие [10, 16]. В свою очередь, комплекс общих флавоноидов сырья *G. glabra* (включающий ликвиритин, изоликвиритин, глабридин и ликвиритигенин) проявляет мощный антиоксидантный потенциал, антимикробную активность и способность нейтрализовать свободные радикалы [9,19,11]. Синергетическое действие ГК и флавоноидов определяет высокую лечебно-профилактическую ценность фитопрепаратов и функциональных продуктов на основе экстрактов солодки [30].

Для надежной оценки качества сырья *G. glabra* и контроля содержания целевых аналитов в современной аналитической практике широко применяются методы высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ/HPLC) и спектрофотометрии [4,31]. ВЭЖХ позволяет проводить точное количественное определение ГК и индивидуальных флавоноидов, тогда как спектрофотометрический анализ обеспечивает экспрессную оценку суммарного содержания фенольных соединений [25,15].

Качественный и количественный состав БАВ в дикорастущих и культивируемых популяциях *G. glabra* подвержен значительной изменчивости. Накопление вторичных метаболитов в растительной матрице напрямую зависит от эколого-климатических условий произрастания, почвенно-грунтовых факторов, высоты над уровнем моря, уровня инсоляции и доступности влаги [13,22,29].

Таблица 1.

Влияние почвенно-климатических и экологических стрессовых факторов на синтез биологически активных веществ (глицирризиновой кислоты и флавоноидов) *Glycyrrhiza glabra* L. [28,29,30,31,32]

Область	Климатические условия почвы и показатели стресса	Засоленность почвы (ЕС _е , дСм ⁻¹ / Уровень засоленности)	Среднегодовое количество осадков (мм)	Максимальная летняя температура (°C)	Количество биологически активных веществ (% от сухого веса)
Республике Каракалпакстан	Сильное засоление, засоленные почвы, высокая температура и нехватка воды (сильный абиотический стресс)	8,0 – 16,5 дСм ⁻¹ (Высоко-солёный раствор)	80-110 mm	+42-+45 °C	Глицирризиновая кислота: 6,2–8,5% Флавоноиды: 2,1–2,8%
Хорезмской областях	Умеренно и сильно засоленные орошаемые почвы, засуха	4,5 – 9,2 дСм ⁻¹ (Умеренно и сильно солёная среда)	90-120 mm	+40+43 °C	Глицирризиновая кислота: 5,5–7,2% Флавоноиды: 1,8–2,4%
Джизакской областях	Умеренно и слабо засоленные гипсовые/серые почвы, относительно низкий уровень абиотического стресса.	1,2 – 3,8 дСм ⁻¹ (слабосолевой/несолевой раствор)	280-380 mm	+36+39 °C	Глицирризиновая кислота: 3,8–5,2% Флавоноиды: 1,2–1,6%

В условиях аридного и резко континентального климата Центральной Азии экофизиологический стресс (высокие температуры, засоление почв, дефицит осадков) оказывает существенное влияние на биосинтетические пути растений, стимулируя или подавляя синтез определенных групп метаболитов [14,24].

Узбекистан обладает значительными естественными ресурсами *G. glabra*, произрастающей в различных физико-географических зонах — от водосбора Амударьи (Каракалпакстан, Хорезмская область) до предгорных и горных районов [26,6,7]. Однако химический профиль и динамика накопления глицирризиновой кислоты и общих флавоноидов в сырье, заготовленном в различных регионах республики, остаются недостаточно систематизированными [19,21,17].

Сравнительный анализ биохимического состава солодки из различных экотипов Узбекистана имеет решающее значение для стандартизации сырья, выявления регионов с наибольшим накоплением БАВ и оптимизации параметров получения высококачественных экстрактов [6,8].

В связи с этим сырьё данного региона было выбрано в качестве основного объекта для дальнейших исследований, направленных на оптимизацию процессов сушки и экстракции. На следующем этапе были детально изучены кинетика процесса сушки корней солодки, оптимальные температурные режимы и степень сохранности биологически активных веществ [1,2,3].

Извлечение биологически активных веществ из корней солодки (*Glycyrrhiza glabra* L.) с высоким выходом во многом зависит от способа сушки растительного сырья, который является одним из ключевых технологических этапов [2,21]. Снижение содержания влаги до нормативного уровня предотвращает развитие микроорганизмов, обеспечивает длительное хранение сырья, а также способствует сохранению стабильности глицирризиновой кислоты, флавоноидов и других биологически активных соединений. В связи с этим с целью стандартизации сырья были проведены сравнительные исследования различных способов сушки и факторов, влияющих на эффективность процесса [21]. Согласно результатам исследований, доказано, что при выборе оптимальных условий можно получить максимальное количество полифенольных веществ. В соответствии с принципами системного анализа, выбор оптимального растительного сырья должен основываться на комплексной оценке совокупности физико-химических показателей и содержания биологически активных веществ [2].

Материалы и методы исследования

Был изучен состав биологически активных веществ в образцах корней *Glycyrrhiza glabra* L., собранных в Республике Каракалпакстан, Хорезмской и Джизакской областях. На основании результатов определения содержания глицирризиновой кислоты и суммарных флавоноидов в корнях солодки, собранных в Республике Каракалпакстан, Хорезмской и Джизакской областях Узбекистана, для дальнейших исследований было отобрано сырье из региона с самым высоким содержанием биологически активных веществ: Для выбранных образцов были проведены исследования, по сравнительной оценке, различных способов сушки с целью определения оптимальных технологических режимов, обеспечивающих максимальную сохранность биологически активных соединений.

С целью сравнительной оценки эффективности различных способов сушки корней солодки были использованы следующие методы: принудительная сушка горячим воздухом, вакуумная сушка при температуре 60 ± 5 °С и остаточном давлении 0,6–0,8 кгс/см², сушка с использованием инфракрасного излучения на установке ИКС–2М, а также естественная сушка в хорошо проветриваемом месте, защищённом от воздействия прямых солнечных лучей. На первом этапе корни солодки высушивали в естественных условиях. Для этого сырьё раскладывали слоем толщиной 7–10 см в хорошо проветриваемом помещении, защищённом от прямых солнечных лучей, с периодическим перемешиванием.

Содержание глицирризиновой кислоты в корнях солодки (*Glycyrrhiza glabra* L.) определяли методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ).

Для анализа из предварительно измельчённого и просеянного через сито с размером отверстий 0,5 мм сухого порошка корней отбирали аналитическую навеску массой 1,0 г и помещали её в мерную колбу вместимостью 100 мл. Затем добавляли 50 мл 70 %-ного раствора метанола и проводили экстракцию в ультразвуковой ванне в течение 30 мин. После охлаждения объём раствора доводили до метки 70 %-ным метанолом и фильтровали через бумажный фильтр. Полученный фильтрат дополнительно фильтровали через мембранный фильтр с размером пор 0,45 мкм и использовали для анализа методом ВЭЖХ.

Хроматографический анализ проводили на жидкостном хроматографе Shimadzu LC-20A с использованием колонки C18 (250 × 4,6 мм; 5 мкм). В качестве подвижной фазы применяли воду, содержащую 0,1 % фосфорной кислоты (элюент А), и ацетонитрил (элюент В) в градиентном режиме. Скорость потока составляла 1,0 мл/мин, температура колонки — 30°С, объём вводимой пробы — 20 мкл, длина волны детектирования — 254 нм. В качестве стандартного образца использовали глицирризиновую кислоту чистотой 98 % (Sigma-Aldrich).

Содержание глицирризиновой кислоты в корнях солодки и полученных экстрактах определяли по следующей формуле:

$$X = \frac{S_1 \cdot a_0 \cdot P}{S_0 \cdot a_1}$$

где:

X — содержание глицирризиновой кислоты в исследуемом сырье, %;

S_1 — площадь пика глицирризиновой кислоты на хроматограмме исследуемого раствора;

S_0 — площадь пика глицирризиновой кислоты на хроматограмме стандартного раствора;

P — содержание глицирризиновой кислоты в стандартном образце, %;

a_0 — масса стандартного образца, г;

a_1 — масса анализируемого сырья, г.

Методика определения содержания общих флавоноидов

Содержание общих флавоноидов в корнях солодки (*Glycyrrhiza glabra* L.) определяли спектрофотометрическим методом, основанным на реакции комплексообразования с хлоридом алюминия, с выражением результатов в пересчёте на рутин.

Для анализа из предварительно высушенного и просеянного через сито с размером отверстий 0,5 мм порошка корней солодки отбирали аналитическую навеску массой 1,0 г и помещали её в круглодонную колбу вместимостью 150 мл. К навеске добавляли 30 мл 50 %-ного этанола, колбу соединяли с обратным холодильником и проводили экстракцию на кипящей водяной бане в течение 30 минут, периодически встряхивая содержимое.

Полученный горячий экстракт фильтровали через ватный фильтр в мерную колбу вместимостью 100 мл. Остаток сырья на фильтре дважды повторно экстрагировали по 30 мл 50 %-ного этанола при тех же условиях. Все фильтраты объединяли, охлаждали и доводили объём до метки 50 %-ным этанолом, после чего тщательно перемешивали. Полученный раствор использовали в качестве раствора А.

Для анализа в мерную колбу вместимостью 25 мл вносили 1,0 мл раствора А, затем добавляли 1,0 мл 2 %-ного раствора хлорида алюминия в 95 %-ном этаноле. После этого объём доводили до метки 95 %-ным этанолом и тщательно перемешивали.

Раствор сравнения готовили аналогичным образом, однако вместо раствора хлорида алюминия добавляли одну каплю разбавленной уксусной кислоты, после чего объём также доводили до 25 мл 95 %-ным этанолом.

После выдерживания растворов при комнатной температуре в течение 40 минут оптическую плотность образовавшегося комплекса измеряли при длине волны 415 нм на спектрофотометре UV–Vis с использованием кюветы с длиной оптического пути 10 мм.

Для построения калибровочного графика использовали рабочий стандартный образец рутина. Для этого 0,050 г рутина, предварительно высушенного при температуре 130–135 °С в течение 3 часов, точно взвешивали, помещали в мерную колбу вместимостью 100 мл, растворяли приблизительно в 85 мл 95 %-ного этанола, затем после охлаждения доводили объём до метки тем же растворителем и тщательно перемешивали. Стандартный раствор также подвергали реакции с хлоридом алюминия в условиях, аналогичных исследуемым образцам, после чего измеряли его оптическую плотность.

Содержание общих флавоноидов в пересчёте на рутин рассчитывали по следующей формуле:

$$X = \frac{D \cdot m_0 \cdot 100}{D_0 \cdot m \cdot (100 - w)}$$

где:

X — содержание общих флавоноидов (в пересчёте на рутин), %;

D — оптическая плотность исследуемого раствора;

D₀ — оптическая плотность стандартного раствора рутина;

m — масса порошка корней солодки, взятая для анализа, г;

m₀ — масса рабочего стандартного образца рутина, г;

W — потеря массы сырья при высушивании (влажность), %.

В качестве качественной реакции к исследуемому раствору добавляли 2 %-ный раствор хлорида алюминия. Появление зелёно-жёлтой окраски раствора подтверждало присутствие флавоноидов.

Все анализы выполняли в трёх параллельных повторностях, а результаты представляли в виде среднего значения $\pm$ стандартного отклонения ($M \pm SD$).

Для оценки статистической значимости различий между образцами и методами сушки из Республики Каракалпакстан, Хорезмской и Джизакской областей использовался однофакторный дисперсионный анализ с последующим тестом Тьюки. Различия считались статистически значимыми при уровне значимости $p < 0,05$. Все статистические расчеты проводились с помощью программы SPSS (версия 26.0).

Данная методика соответствует требованиям Государственной фармакопеи и широко применяемому в научных исследованиях спектрофотометрическому методу с использованием хлорида алюминия, что позволяет определять содержание общих флавоноидов в корнях солодки в пересчёте на рутины (%).

Результаты и обсуждение

Содержание глицирризиновой кислоты определяли методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ), а содержание общих флавоноидов — спектрофотометрическим методом. Результаты анализа представлены в Таблице 2.

Таблица 2.

Содержание глицирризиновой кислоты и общих флавоноидов в корнях *Glycyrrhiza glabra* L. собранных в различных регионах

№	Регион	Глицирризиновая кислота, %	Общие флавоноиды, %
1	Республика Каракалпакстан	$6,14 \pm 0,18^a$	$4,25 \pm 0,15^a$
2	Хорезмская область	$5,62 \pm 0,16^b$	$3,98 \pm 0,13^b$
3	Джизакская область	$4,73 \pm 0,14^c$	$3,86 \pm 0,12^b$
Статистика	ANOVA (F-критерий, p-значение)	$F=61.85; p<0.001$	$F=6.94; p<0.027$

Примечание: Разные буквы (^a, ^b, ^c) в пределах одного столбца указывают на статистически значимые различия между образцами ($p < 0.05$, One-Way ANOVA, критерий Тьюки).

Согласно данным, приведённым в таблице 2, установлено, что содержание глицирризиновой кислоты и общих флавоноидов в корнях *Glycyrrhiza glabra* L. в определённой степени зависит от региона произрастания. Наибольшее содержание глицирризиновой кислоты было выявлено в образцах, собранных в Республике Каракалпакстан ($6,14 \pm 0,18$ %), что превышало соответствующие показатели образцов из Хорезмской ($5,62 \pm 0,16$ %) и Джизакской ($4,73 \pm 0,14$ %) областей.

Аналогичная закономерность наблюдалась и для содержания общих флавоноидов. Максимальное их количество было обнаружено в образцах из Республики Каракалпакстан ($4,25 \pm 0,15$ %), тогда как в образцах, собранных в Хорезмской и Джизакской областях, этот показатель составил соответственно $3,98 \pm 0,13$ % и $3,86 \pm 0,12$ %.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что почвенно-климатические условия, уровень влажности и экологические факторы оказывают существенное влияние на накопление биологически активных веществ в корнях солодки. В частности, более высокое содержание глицирризиновой кислоты и флавоноидов в образцах, собранных в Республике Каракалпакстан, указывает на высокую биологическую ценность данного растительного сырья и его перспективность для получения стандартизованных растительных экстрактов.

Таким образом, результаты, представленные в таблицах 2, свидетельствуют о том, что образцы корней солодки, собранные во всех исследованных регионах, соответствуют требованиям Государственной фармакопеи по содержанию биологически активных веществ. Однако наибольшие значения содержания экстрактивных веществ, глицирризиновой кислоты и флавоноидов были выявлены в образцах, собранных в Республике Каракалпакстан.

В связи с тем, что образцы корней солодки, заготовленные в Республике Каракалпакстан, содержали наибольшее количество биологически активных веществ, они были отобраны в качестве объекта дальнейших исследований по выбору оптимального способа сушки.

При естественной сушке корней солодки обеспечивается равномерное удаление влаги из растительного сырья. Вместе с тем известно, что при сушке под воздействием прямых солнечных лучей возможно снижение содержания биологически активных веществ, в частности флавоноидов, вследствие частичного разрушения некоторых фенольных соединений под действием ультрафиолетового излучения. Поэтому естественную сушку проводили в хорошо проветриваемом месте, защищённом от прямых солнечных лучей. Для каждого способа сушки были оценены продолжительность процесса, динамика снижения влажности и степень сохранности биологически активных веществ после завершения процесса. Полученные результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3.

**Влияние способа сушки на содержание биологически активных веществ в корнях
Glycyrrhiza glabra L**

Способ сушки	Глицирризиновая кислота, %	Общие флавоноиды (в пересчёте на рутин), %	Продолжительность сушки, ч
Принудительная сушка горячим воздухом (60 ± 5 °C)	$6,08 \pm 0,17^a$	$4,18 \pm 0,14^a$	30
Вакуумная сушка ($0,6-0,8$ кгс/см ² ; 60 ± 5 °C)	$6,10 \pm 0,18^a$	$4,20 \pm 0,15^a$	24
Инфракрасная сушка (ИКС–2М)	$5,21 \pm 0,16^b$	$3,24 \pm 0,12^b$	18
Естественная сушка	$6,06 \pm 0,16^a$	$4,12 \pm 0,13^a$	72
статистика	ANOVA (F-критерий, р-значение)	$F=21.64; p<0.001$	$F=31.42; p<0.001$

Примечание: Одинаковые буквы (^a) означают отсутствие статистически значимых различий ($p > 0.05$). Инфракрасная сушка (^b) достоверно снижает содержание веществ по сравнению с остальными методами ($p < 0.05$).

Анализ результатов, представленных в таблице 3, показал, что способ сушки оказывает существенное влияние на степень сохранности глицирризиновой кислоты и общих флавоноидов в корнях солодки. Наиболее высокое содержание глицирризиновой кислоты ($6,10 \pm 0,18$ %) и общих флавоноидов ($4,20 \pm 0,15$ %) было зафиксировано в образцах, высушенных под вакуумом при температуре $60 \pm 5^\circ\text{C}$. При сушке с использованием принудительной циркуляции горячего воздуха биологически активные вещества также сохранялись практически полностью, а их содержание составило соответственно $6,08 \pm 0,17$ % и $4,18 \pm 0,14$ %.

При естественной сушке значительного снижения содержания биологически активных веществ не наблюдалось, однако продолжительность процесса (72 часа) снижает экономическую эффективность данного способа в условиях промышленного производства. Использование инфракрасного излучения обеспечило наименьшую продолжительность сушки (18 часов), однако сопровождалось снижением содержания глицирризиновой кислоты ($5,21 \pm 0,16$ %) и общих флавоноидов ($3,24 \pm 0,12$ %) по сравнению с другими методами.

Таким образом, с точки зрения максимального сохранения биологически активных веществ и сокращения продолжительности процесса наиболее эффективным методом является вакуумная сушка. Вместе с тем сушка с использованием принудительной циркуляции горячего воздуха также была признана эффективным технологическим способом, позволяющим получать растительное сырьё высокого качества. Полученные результаты послужили научной основой для последующего выбора оптимальных параметров экстракции глицирризиновой кислоты и флавоноидов из высушенных корней солодки.

Заключение

В результате исследования была проведена сравнительная оценка содержания глицирризиновой кислоты и суммарных флавоноидов в корнях *Glycyrrhiza glabra* L., собранных в Хорезмской области, Джизакской области и Республике Каракалпакстан Республики Узбекистан. Установлено, что накопление биологически активных веществ зависит от региона произрастания и определяется почвенно-климатическими условиями.

Методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) установлено, что наибольшее содержание глицирризиновой кислоты характерно для образцов, собранных в Республике Каракалпакстан ($6,14 \pm 0,18$ %), тогда как спектрофотометрический анализ показал максимальное содержание общих флавоноидов ($4,25 \pm 0,15$ %) в этих же образцах. Полученные результаты свидетельствуют о высокой биологической ценности сырья Республики Каракалпакстан, что позволило выбрать его для дальнейших исследований по оптимизации процесса сушки.

Сравнительная оценка различных способов сушки показала, что наиболее эффективным методом является вакуумная сушка при температуре $60 \pm 5^\circ\text{C}$ и остаточном давлении $0,6\text{--}0,8$ кгс/см², обеспечивающая максимальную сохранность глицирризиновой кислоты ($6,10 \pm 0,18$ %) и общих флавоноидов ($4,20 \pm 0,15$ %) при сокращении продолжительности процесса по сравнению с естественной сушкой. Сушка с использованием принудительной циркуляции горячего воздуха также показала высокую эффективность и может быть рекомендована для промышленной переработки растительного сырья.

Полученные результаты могут служить научной основой для выбора высококачественного растительного сырья, оптимизации технологии сушки, разработки стандартизованных экстрактов и создания функциональных пищевых продуктов и биологически активных добавок на основе корней *Glycyrrhiza glabra* L

Список литературы

1. Артиков А.А., Машарипова З.А. Оптимальное программное управление процессом сушки при использовании микроволновой энергии // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2016. – № 3.
2. Артиков А.А., Джураев Х.Ф., Машарипова З.А. Системное мышление анализ, и нахождение оптимальных решений // Монография. Издательства «Дурдона» Бухара. – 2019.
3. Белова О.А. Фармакогностическое исследование корней и травы солодки голой (*Glycyrrhiza glabra* L.) и солодки уральской (*Glycyrrhiza uralensis* Fisch.): дис. ... канд. фармацевт. наук: 3.4.2 – Фармацевтическая химия, фармакогнозия. – Самара. – 2024. – 195 с.
4. Бровченко Б.В., Ермакова В.А., Кузьменко А.Н., Самылина И.А., Краснюк (младший) П. Оптимизация методов ВЭЖХ для количественного определения глицирризовой кислоты в корнях солодки. Разработка и регистрация лекарственных средств. 2018; (3): ст.162–165.
5. Куркин В.А., Рязанова Т.К., Егоров М.В., Белова О.А. Вопросы количественного определения биологически активных соединений корней солодки. Фармация, 2021; С. 24–31 [Электронный ресурс]. – Т. 70, № 7. URL: <https://doi.org/10.29296>. (дата обращения 24.09.2026)
6. Саноев А.И., Зарипова С.А., Ботиров Р.А., Халилов Р.М., Сагдуллаев Ш.Ш. Получение суммы агликоновых флавоноидов из отходов переработки корней *Glycyrrhiza glabra* L. *Universum: химия и биология*, vol. 1, no. 4 (142), 2026, P. 61–66. doi:10.32743/UniChem.2026.142.4.22353.
7. Abduraimov OS, Li W, Shomurodov HF, Feng Y. The Main Medicinal Plants in Arid Regions of Uzbekistan and Their Traditional Use in Folk Medicine. *Plants* (Basel). 2023 Aug 15;12(16): 2950. doi: 10.3390/plants12162950. PMID: 37631161; PMCID: PMC10458710.
8. Ali Esmail Al-Snafi *Glycyrrhiza glabra*: A phytochemical and pharmacological review *IOSR Journal of Pharmacy* (IOSRPHR), vol. 8, no. 06, 2018, P. 1–17.
9. Asl MN, Hosseinzadeh H // Review of pharmacological effects of *Glycyrrhiza* sp. and its bioactive compounds. *Phytother Res.* – 2008. – DOI: 10.1002/ptr.2362.
10. Bailly C, Vergoten G. *Glycyrrhizin*: An alternative drug for the treatment of COVID-19 infection and the associated respiratory syndrome? *Pharmacol Ther.* 2020 Oct;214:107618. doi: 10.1016/j.pharmthera.2020.107618. Epub 2020 Jun 24.

11. Docimo, T., Celano, R., Lambiase, A., Di Sanzo, R., Serio, S., Santoro, V., Coccetti, P., Russo, M., Rastrelli, L. & Piccinelli, A.L. (2024). Exploring Influence of Production Area and Harvest Time on Specialized Metabolite Content of *Glycyrrhiza glabra* Leaves and Evaluation of Antioxidant and Anti-Aging Properties. *Antioxidants*, 13(1), 93. – DOI: 10.3390/antiox13010093.
12. Egamberdieva, D., Jabborova, D. & Wirth, S. Allelopathic potential and stress-induced secondary metabolites in *Glycyrrhiza glabra* grown under saline soil conditions of Aral Sea region. *Soil Science and Plant Nutrition*. T. 68. – 2022.
13. Eghlima, G., Tafreshi, Y.M., Aghamir, F. et al. Regional environmental impacts on growth traits and phytochemical profiles of *Glycyrrhiza glabra* L. for enhanced medicinal and industrial use. *BMC Plant Biol* 25, 116 (2025). – DOI: 10.1186/s12870-025-06147-z.
14. Farag MA, Porzel A, Wessjohann LA. Comparative metabolite profiling and fingerprinting of medicinal licorice roots using a multiplex approach of GC-MS, LC-MS and 1D NMR techniques. *Phytochemistry*. 2012 Apr; 76:60–72. doi: 10.1016/j.phytochem.2011.12.010. Epub 2012 Feb 13. PMID: 22336263.
15. Han YJ, Kang B, Yang EJ, Choi MK, Song IS. Simultaneous Determination and Pharmacokinetic Characterization of Glycyrrhizin, Isoliquiritigenin, Liquiritigenin, and Liquiritin in Rat Plasma Following Oral Administration of *Glycyrrhizae Radix* Extract. *Molecules*. 2019 May 10;24(9):1816. doi: 10.3390/molecules24091816. PMID: 31083444; PMCID: PMC6539080.
16. Kao TC, Wu CH, Yen GC. Bioactivity and potential health benefits of licorice. *J Agric Food Chem*. 2014 Jan 22;62(3):542–53. doi: 10.1021/jf404939f. Epub 2014 Jan 8. PMID: 24377378.
17. Khaitov B, Karimov A, Khaitbaeva J, Sindarov O, Karimov A, Li Y. Perspectives of Licorice Production in Harsh Environments of the Aral Sea Regions. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022; 19(18):11770. – DOI: 10.3390/ijerph191811770.
18. Khaitov, B., Karimov, A., Allanov, K. & Islamov, S. Impact of soil salinity and drought stress on the secondary metabolite accumulation in wild *Glycyrrhiza glabra* L. in the Aral Sea basin // *Journal of Arid Land*. – 2021. – T. 13, № 8. – P. 845–858.
19. Madraximova M.K., Masharipova Z.A., Ilashova Y.H., Asatova U.U. Extraction of Biologically Active Substances for Food from the Root of *Glycyrrhiza Glabra* L [Электронный ресурс]. // *American Journal of Social and Humanitarian Research* Vol. 7 Issue 5 | P. 181–186|ISSN: 2690–9626. – T. 7, № 5. URL: <https://globalresearchnetwork.us/index.php/ajshr>. (дата обращения 24.09.2026)
20. Mamurova, M., Rakhimova, N., Sharipov, A. & Olimov, U. Assessment of glycyrrhizin and total flavonoid content in licorice roots across different ecological zones of Uzbekistan. *Plant Physiology and Biochemistry*, 179, 112–121. – 2022.
21. Masharipova Z.A., Yesboganova M.K. Qizilmiya ildiziga samarali ishlov berish [Электронный ресурс]. // *International Journal of Advanced Technology and Natural Sciences*. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/>. (дата обращения 24.09.2026)

22. Montoro, P. Metabolic profiling of roots of liquorice (*Glycyrrhiza glabra*) from different geographical areas by ESI/MS/MS and determination of major metabolites by LC-ESI/MS and LC-ESI/MS/MS. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*. – DOI: 10.1016/J.JPBA.2010.10.004.
23. Pastorino G, Cornara L, Soares S, Rodrigues F, Oliveira MBPP. Liquorice (*Glycyrrhiza glabra*): A phytochemical and pharmacological review. *Phytother Res*. 2018 Dec; 32(12):2323–2339. doi: 10.1002/ptr.6178. Epub 2018 Aug 17. PMID: 30117204; PMCID: PMC7167772.
24. Rahman, A.M. Albadrani, G., Ahmad Waraich, E., Hussain Awan, T., Yavaş, İ., & Hussain, S. (2023). Plant Secondary Metabolites and Abiotic Stress Tolerance: Overview and Implications. In *Plant Abiotic Stress Responses and Tolerance Mechanisms*. IntechOpen. – DOI: 10.5772/intechopen.111696.
25. Rizzato G, Scalabrin E, Radaelli M, Capodaglio G, Piccolo O. A new exploration of licorice metabolome. *Food Chem*. 2017 Apr 15; 221:959–968. doi: 10.1016/j.foodchem.2016.11.068. Epub 2016 Nov 17. PMID: 27979300.
26. Sanoev A, Okhundedaev B, Sham'yanov I, Bobakulov K, Zaripova S, Botirov R, Sadikov A, Sagdullayev S, Ali F, Garayev E. Selective Extraction of Lipophilic Bioactive Compounds from Industrial Root Meal of *Glycyrrhiza glabra* L. *Molecules*. 2026; 31(14):2411. – DOI: 10.3390/molecules31142411.
27. Shang Z, Liu C, Qiao X, Ye M. Chemical analysis of the Chinese herbal medicine licorice (Gan-Cao): An update review. *J Ethnopharmacol*. 2022 Dec 5;299:115686. doi: 10.1016/j.jep.2022.115686. Epub 2022 Sep 5. PMID: 36067839.
28. Toderich, K., Mukimov, T., Shoaib, M. & Khujanazarov, T. Salt tolerance mechanisms and phytochemical variations in wild medicinal halophytes of Uzbekistan. *Industrial Crops and Products*, 154, 112680. – 2020.
29. Wahab S, Annadurai S, Abullais SS, Das G, Ahmad W, Kandasamy G, Vasudevan R, Ali MS, Amir M. *Glycyrrhiza glabra* (Licorice): A Comprehensive Review on Its Phytochemistry, Biological Activities, Clinical Evidence and Toxicology. *Plants (Basel)*. 2021 Dec 14; 10(12): 2751. doi: 10.3390/plants10122751.
30. Yamamoto S, Shimomura A, Watanabe S, Kojoma M, Suzuki A. Overwhelming glycyrrhizin production in *Glycyrrhiza glabra* induced by rhizobial symbiosis. *J Nat Med*. 2025 Jul;79(4): 833–844. doi: 10.1007/s11418-025-01918-2. Epub 2025 May 25. PMID: 40415147; PMCID: PMC12228657.
31. Zhang M., Wang M.-Y., Liu Y.-Q., Shi H.-M.; and Li, X.-B. (2011) Quality analysis of raw and honey-processed licorice of *Glycyrrhiza uralensis* Fisch. and *G. glabra* L. by simultaneous determination of five bioactive components using RPHPLC/DAD method // *Journal of Food and Drug Analysis*., Article 14. Available at:. – 2011. – T. 19, № 2. – DOI: 10.38212/2224–6614.2260.
32. Zhang, Y., Abdiev, A., Chen, X. & Boboev, M. Comparative analysis of bioactive compound accumulation in *Glycyrrhiza glabra* under extreme abiotic stress in Central Asian drylands. *Environmental and Experimental Botany*, 208, 105241. – 2023.

References

1. Artikov A.A., Masharipova Z.A. [Optimal program control of the drying process using microwave energy]. *Khranenie i pererabotka sel'khozsyrya*, 2016, no. 3, P. 27–29. (In Russ.)
2. Artikov A.A., Dzhuraev Kh.F., Masharipova Z.A. [Systems thinking analysis and finding optimal solutions]. Monograph. Bukhara, Durdona Publ., 2019. 185 P. (In Russ.)
3. Belova O.A. [Pharmacognostic study of roots and herb of licorice (*Glycyrrhiza glabra* L.) and Chinese licorice (*Glycyrrhiza uralensis* Fisch.)]. Dis. ... kand. farmatsevt. nauk. Samara, 2024. 195 P. (In Russ.)
4. Brovchenko B.V., Ermakova V.A., Kuz'menko A.N., Samylina I.A., Krasnyuk I.I. (Jr.) [Optimization of HPLC methods for quantitative determination of glycyrrhizic acid in licorice roots]. *Razrabotka i registratsiya lekarstvennykh sredstv*, 2018, no. 3, P. 162–165. (In Russ.)
5. Kurkin V.A., Ryazanova T.K., Egorov M.V., Belova O.A. [Issues of quantitative determination of biologically active compounds of licorice roots]. *Farmatsiya*, 2021, vol. 70, no. 7, P. 24–31. (In Russ.)
6. Sanoev A.I., Zaripova S.A., Botirov R.A., Khalilov R.M., Sagdullaev Sh.Sh. [Obtaining the sum of aglycone flavonoids from processing waste of *Glycyrrhiza glabra* L. roots]. *Universum: khimiya i biologiya*, 2026, no. 4 (142), P. 61–66. DOI 10.32743/UniChem.2026.142.4.22353. (In Russ.)
7. Abduraimov O.S., Li W., Shomurodov H.F., Feng Y. The main medicinal plants in arid regions of Uzbekistan and their traditional use in folk medicine. *Plants*, 2023, vol. 12, no. 16, art. 2950. DOI 10.3390/plants12162950.
8. Al-Snafi A.E. *Glycyrrhiza glabra*: A phytochemical and pharmacological review. *IOSR Journal of Pharmacy (IOSRPHR)*, 2018, vol. 8, no. 6, P. 1–17.
9. Asl M.N., Hosseinzadeh H. // Review of pharmacological effects of *Glycyrrhiza* sp. and its bioactive compounds. *Phytotherapy Research*. – 2008. – No. 6. – P. 709–724. – DOI: 10.1002/ptr.2362.
10. Bailly C., Vergoten G. Glycyrrhizin: An alternative drug for the treatment of COVID-19 infection and the associated respiratory syndrome? *Pharmacology & Therapeutics*, 2020, vol. 214, art. 107618. DOI 10.1016/j.pharmthera.2020.107618.
11. Docimo T., Celano R., Lambiase A., Di Sanzo R., Serio S., Santoro V., Coccetti P., Russo M., Rastrelli L., Piccinelli A.L. Exploring influence of production area and harvest time on specialized metabolite content of *Glycyrrhiza glabra* leaves and evaluation of antioxidant and anti-aging properties. *Antioxidants*, 2024, vol. 13, no. 1, art. 93. DOI 10.3390/antiox13010093.
12. Egamberdieva D., Jabborova D., Wirth S. Allelopathic potential and stress-induced secondary metabolites in *Glycyrrhiza glabra* grown under saline soil conditions of Aral Sea region. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2022, vol. 68, no. 3, P. 301–310.
13. Eghlima G., Tafreshi Y.M., Aghamir F. et al. Regional environmental impacts on growth traits and phytochemical profiles of *Glycyrrhiza glabra* L. for enhanced medicinal and industrial use. *BMC Plant Biology*, 2025, vol. 25, art. 116. DOI 10.1186/s12870-025-06147-z.

14. Farag M.A., Porzel A., Wessjohann L.A. Comparative metabolite profiling and fingerprinting of medicinal licorice roots using a multiplex approach of GC-MS, LC-MS and 1D NMR techniques. *Phytochemistry*, 2012, vol. 76, P. 60–72. DOI 10.1016/j.phytochem.2011.12.010.
15. Han Y.J., Kang B., Yang E.J., Choi M.K., Song I.S. Simultaneous determination and pharmacokinetic characterization of glycyrrhizin, isoliquiritigenin, liquiritigenin, and liquiritin in rat plasma following oral administration of *Glycyrrhizae Radix* extract. *Molecules*, 2019, vol. 24, no. 9, art. 1816. DOI 10.3390/molecules24091816.
16. Kao T.C., Wu C.H., Yen G.C. Bioactivity and potential health benefits of licorice // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. – 2014. – No. 3. – P. 542–553. – DOI: 10.1021/jf404939f.
17. Khaitov B., Karimov A., Khaitbaeva J., Sindarov O., Karimov A., Li Y. Perspectives of licorice production in harsh environments of the Aral Sea regions. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, vol. 19, no. 18, art. 11770. DOI 10.3390/ijerph191811770.
18. Khaitov B., Karimov A., Allanov K., Islamov S. Impact of soil salinity and drought stress on the secondary metabolite accumulation in wild *Glycyrrhiza glabra* L. in the Aral Sea basin // *Journal of Arid Land*. – 2021. – No. 8. – P. 845–858.
19. Madraximova M.K., Masharipova Z.A., Ilashova Y.H., Asatova U.U. Extraction of biologically active substances for food from the root of *Glycyrrhiza glabra* L. *American Journal of Social and Humanitarian Research*, 2025, vol. 7. ISSN 2690–9626. URL:.. – No. 5. – P. 181–186. (дата обращения: 19.09.2026).
20. Mamurova M., Rakhimova N., Sharipov A., Olimov U. Assessment of glycyrrhizin and total flavonoid content in licorice roots across different ecological zones of Uzbekistan. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2022, vol. 179, P. 112–121.
21. Masharipova Z.A., Yesboganova M.K. [Effective processing of licorice root]. *International Journal of Advanced Technology and Natural Sciences*. URL: (In Uzb.). (дата обращения: 19.09.2026).
22. Montoro P. Metabolic profiling of roots of liquorice (*Glycyrrhiza glabra*) from different geographical areas by ESI/MS/MS and determination of major metabolites by LC-ESI/MS and LC-ESI/MS/MS // *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*. DOI. – DOI: 10.1016/j.jpba.2010.10.004.
23. Pastorino G., Cornara L., Soares S., Rodrigues F., Oliveira M.B.P.P. Liquorice (*Glycyrrhiza glabra*): A phytochemical and pharmacological review. *Phytotherapy Research*, 2018, vol. 32, no. 12, P. 2323–2339. DOI 10.1002/ptr.6178.
24. Rahman A., Albadrani G.M., Ahmad Waraich E., Hussain Awan T., Yavaş İ., Hussain S. Plant secondary metabolites and abiotic stress tolerance: Overview and implications. In *Plant Abiotic Stress Responses and Tolerance Mechanisms*. IntechOpen, 2023. DOI 10.5772/intechopen.111696.
25. Rizzato G., Scalabrin E., Radaelli M., Capodaglio G., Piccolo O. A new exploration of licorice metabolome. *Food Chemistry*, 2017, vol. 221, P. 959–968. DOI 10.1016/j.foodchem.2016.11.068.

26. Sanoev A., Okhundedaev B., Sham'yanov I., Bobakulov K., Zaripova S., Botirov R., Sadikov A., Sagdullayev S., Ali F., Garayev E. Selective extraction of lipophilic bioactive compounds from industrial root meal of *Glycyrrhiza glabra* L. *Molecules*, 2026, vol. 31, no. 14, art. 2411. DOI 10.3390/molecules31142411.
27. Shang Z., Liu C., Qiao X., Ye M. Chemical analysis of the Chinese herbal medicine licorice (Gan-Cao): An update review // *Journal of Ethnopharmacology*. – 2022. – Art. 115686. – DOI: 10.1016/j.jep.2022.115686.
28. Toderich K., Mukimov T., Shoaib M., Khujanazarov T. Salt tolerance mechanisms and phytochemical variations in wild medicinal halophytes of Uzbekistan. *Industrial Crops and Products*, 2020, vol. 154, art. 112680.
29. Wahab S., Annadurai S., Abullais S.S., Das G., Ahmad W., Kandasamy G., Vasudevan R., Ali M.S., Amir M. *Glycyrrhiza glabra* (Licorice): A comprehensive review on its phytochemistry, biological activities, clinical evidence and toxicology. *Plants*, 2021, vol. 10, no. 12, art. 2751. DOI 10.3390/plants10122751.
30. Yamamoto S., Shimomura A., Watanabe S., Kojoma M., Suzuki A. Overwhelming glycyrrhizin production in *Glycyrrhiza glabra* induced by rhizobial symbiosis // *Journal of Natural Medicines*. – 2025. – No. 4. – P. 833–844. – DOI: 10.1007/s11418-025-01918-2.
31. Zhang M., Wang M.-Y., Liu Y.-Q., Shi H.-M., Li X.-B. Quality analysis of raw and honey-processed licorice of *Glycyrrhiza uralensis* Fisch. and *G. glabra* L. by simultaneous determination of five bioactive components using RP-HPLC/DAD method // *Journal of Food and Drug Analysis*. – 2011. – No. 2. – DOI: 10.38212/2224-6614.2260.
32. Zhang Y., Abdiev A., Chen X., Boboev M. Comparative analysis of bioactive compound accumulation in *Glycyrrhiza glabra* under extreme abiotic stress in Central Asian drylands. *Environmental and Experimental Botany*, 2023, vol. 208, art. 105241.

Статья поступила в редакцию: 12.07.2026

Статья принята к публикации: 18.09.2026

Статья опубликована: 18.09.2026

УДК 66.021.3+66.047

DOI: 10.32743/UniTech.2026.150.9.23423

Моделирование процесса выпаривания хлопковой мисцеллы в трубчатых аппаратах с восходящей пленкой жидкости

Хамдамов Музаффар Бердикулович

преподаватель

Гулистанский государственный университет

Республика Узбекистан, г. Гулистан

E-mail: hamdamov1605@gmail.com

Худойбердиев Абдукарим Абсаломович

д-р философии по техн. наукам (PhD), доц.

Наманганский государственный технический университет

Республика Узбекистан, г. Наманган

E-mail: ahudayberdiev@mail.ru

Худайбердиев Абсалом Абдурасулович

д-р техн. наук, проф.

Наманганский государственный технический университет

Республика Узбекистан, г. Наманган

E-mail: jarayon@mail.ru

Хамдамов Анвар Махмудович

д-р техн. наук, проф.

Наманганский государственный технический университет

Республика Узбекистан, г. Наманган

E-mail: jarayon@mail.ru

Библиографическое описание: Моделирование процесса выпаривания хлопковой мисцеллы в трубчатых аппаратах с восходящей пленкой жидкости // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Хамдамов М.Б. [и др.]. 2026. 9(150). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23423>

Modeling the process of evaporation of cotton micella in tubular apparatus with an ascending liquid film

Khamdamov Muzaffar

Gulistan State University

Republic of Uzbekistan, Gulistan

Xudayberdiyev Absalom

doctor of Technological Sciences, Professor of Namangan Institute of Engineering and Technology

Republic of Uzbekistan, Namangan

Khudayberdiyev Abdukarim

doctor of Philosophy in Engineering Sciences (PhD)

Associate Professor, Namangan State Technical University

Republic of Uzbekistan, Namangan

Khamdamov Anvar

doctor of Engineering Sciences, Professor, Namangan State Technical University

Republic of Uzbekistan, Namangan

Аннотация

Предложена математическая модель статике предварительной дистилляции мисцеллы хлопкового масла в однопроходных трубчатых аппаратах с восходящей пленкой жидкости, включающее в себя уравнения температурного изменения показателей физических и теплофизических свойств теплоносителей и их распределения по высоте кипяtilьных труб аппаратов. Модель способствует проектированию аппаратов с оптимальной поверхностью нагрева и выявлять эффективные режимы их эксплуатации на основе анализа распределения температуры и концентрации мисцеллы по высоте трубного пучка при известных технологических (G_0 , a_0 , P , $P_{кн}$) и конструктивных параметрах (d , n) процесса. Приведены отдельные первичные результаты исследования статике выпаривания мисцеллы хлопкового масла в трубчатом испарителе экстракционной установки «Экстракционтехник» предприятия АО «Гулистан экстракт-ёғ». Выявлено, что при регламентированном расходе мисцеллы $G_0 = 3,31$ т/ч для достижения требуемой регламентированной ее концентрации на выходе авых ≥ 95 % при температурах $t_{вых} \leq 110 - 115$ °C потребуется $76 \div 84$ м² активной теплопередающей поверхности аппарата, что составляет 87 % общей поверхности нагрева аппарата. Для повышения эффективности работы аппарата рекомендуется увеличить расход мисцеллы на $13 \div 24$ % в соответствии с выявленным запасом поверхности нагрева (24 м²).

Abstract

A mathematical model of the statics of the preliminary distillation of cottonseed oil miscella in tubular apparatuses with an ascending liquid film is proposed. It facilitates the design of apparatuses with an optimal heating surface and the identification of their effective operating modes based on an analysis of the temperature and miscella concentration distribution along the height of the tube bundle. Selected results of a study of the statics of cottonseed oil miscella evaporation in a tubular evaporator of the Extraction Technician extraction unit of Gulistan Extract-Yog JSC are presented. It was found that, at a miscella flow rate of $G_0 = 3,31$ t/h, to achieve the required outlet concentration $a_{exit} \geq 95$ % at temperatures $t_{exit} \leq 110 - 115$ °C, $76 \div 84$ m² of the active heat-

transfer surface of the apparatus is required. To increase the efficiency of the device, it is recommended to increase the miscella consumption by 13÷24 % in accordance with the identified heating surface reserve (24 m²).

Ключевые слова: масло, мисцелла, дистилляция, выпаривание, дистиллятор, поверхность нагрева, трубка, моделирование. Ключевые слова: масло, мисцелла, дистилляция, выпаривание, дистиллятор, поверхность нагрева, трубка, моделирование.

Keywords: oil, miscella, distillation, evaporation, distiller, heating surface, tube, modeling.

Введение

Предварительная дистилляция мисцеллы растительного масла [4, 6, 15] представляет собой процесс однократного выпаривание двухкомпонентной смеси масла в экстракционном бензине, при котором переход легкокипящего компонента из жидкой фазы в паровую осуществляется в полном соответствии с его относительной летучестью или температурой кипения. Имеющее место явление самоиспарения обеспечивает удаление растворителя из состава мисцеллы при ее кипении за счет тепла перегрева смеси. Данный технологический процесс осуществляется в трубчатых однопроходных выпарных аппаратах (предварительных дистилляторах), работающие с восходящей или падающей пленкой жидкости [3, 5, 11].

Эффективность проведения предварительной стадии дистилляции мисцеллы предопределяет требуемые качественные показатели готового растительного масла. В связи с этим исследования, направленные к выявлению оптимальных технологических режимов проведения данного процесса, способствующие к снижению затрат на осуществление процесса и проектированию аппаратов с оптимальной поверхностью теплопередачи имеют научно-практическую ценность.

Цель. Целью данного исследования является математическое моделирование процесса выпаривания (дистилляции) хлопковой мисцеллы в вертикальных трубчатых дистилляторах, работающие с восходящей пленкой жидкости.

Материалы и методы

Работа посвящена анализу эффективности выпаривания хлопковой мисцеллы на модели статике процесса в трубчатом пленочном испарителе Гулистанского МЭЗ [17] и определению оптимальной величины поверхности нагрева аппарата.

Для расчета оптимальной поверхности нагрева испарителя большой интерес представляет изучение закономерностей, распределения температуры и концентрации упариваемой мисцеллы по высоте его трубного пучка, что осуществляется путем математического моделирования статике данного процесса [7,14].

При составлении математической модели статике предварительной дистилляции мисцеллы в вертикально-трубчатом выпарном аппарате (испарителе) определяющим является процесс, протекающий внутри теплопередающих трубок [7,8,13].

Для исследования процесса выпаривания мисцеллы в вертикальных трубках последние разделены на несколько элементарные участки («квazitрубки») с высотой Δh , имеющие начальную $j-1$ и конечную j границы участков (см. рис.1), где температура жидкости на входе в участок t_{j-1} и на выходе из него t_j [7,9,10].

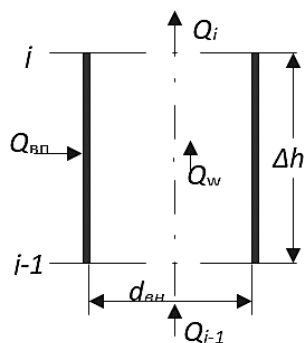


Рисунок 1. Схема к тепловому балансу процесса дистилляции мисцеллы

Основой математического описания процесса выпаривания мисцеллы в трубчатом аппарате является уравнения материального и теплового баланса процесса в элементарном участке труб.

Обобщенное уравнение теплового баланса процесса выпаривания мисцеллы в пучке вертикальных теплопередающих трубок аппарата имеет вид:

$$Q_{j-1} + Q_{w,j-1} + Q_{вп} = Q_j + Q_{w,j} + Q_{кн} + Q_{пот}, \quad (1)$$

где $Q_{j-1} = G_{j-1} c_{j-1} t_{j-1}$ - тепло, поступающего трубный пучок аппарата потоком мисцеллы; $Q_{w,j-1} = W_{j-1} i_{j-1}$ - тепло, вносимое вторичными парами растворителя;

$Q_{вп} = D i_{вп}$ - теплота греющего водяного пара; $Q_j = G_j c_j t_j$ - тепло, уносимое потоком упариваемой в трубках мисцеллой; $Q_{w,j} = W_j i_j$ - уход тепла с парами растворителя; $Q_{кн} = D i_{кн}$ - уход тепла с конденсатом водяного пара; $Q_{пот}$ - потери тепла в окружающую среду; G - массовый расход мисцеллы в трубках, кг/с; D - расход греющего водяного пара на процесс, кг/с; W - расход вторичных паров растворителя, кг/с; t - температура кипения мисцеллы в трубках, °С; c - теплоемкость мисцеллы при температуре t , Дж/(кг °С); i - энтальпия паров растворителя, Дж/(кг °С); $i_{вп}$ и $i_{кн}$ - энтальпия водяного пара и его конденсата, Дж/(кг °С).

Известно, что при статическом режиме потери тепла аппаратом $Q_{пот}$ в окружающую среду составляет постоянную величину и по этой причине ее влияния на тепловой баланс процесса можно не учитывать.

С учетом этого допущения, развернутый вид уравнения теплового баланса процесса выпаривания мисцеллы в элементарном участке вертикальных труб (1) имеет следующий вид

$$G_{j-1} c_{j-1} t_{j-1} + W_{j-1} i_{j-1} + D i_{вп} = G_j c_j t_j + W_j i_j + D i_{кн}, \quad (2)$$

или

$$G_{j-1} c_{j-1} t_{j-1} + W_{j-1} i_{j-1} + D(i_{вп} - i_{кн}) = G_j c_j t_j + W_j i_j, \quad (3)$$

В соответствии с механизмом теплопередачи [12,18] тепло водяного пара $Q_{\text{вп}} = D(i_{\text{вп}} - i_{\text{вп}})$, затрачиваемое на выпаривания жидкости в трубах, складывается из следующих трех составляющих:

- тепла, передаваемого от водяного пара к стенке труб

$$Q_{\text{ст1}} = \alpha_1 \Delta F_{\text{нр}} (t_{\text{кн}} - t_{\text{ст1}}), \quad (4)$$

- тепла, проходящего через стенки труб путем теплопроводности

$$Q_{\text{ст2}} = (\lambda_{\text{ст}} / \delta_{\text{ст}}) \Delta F_{\text{ср}} (t_{\text{ст1}} - t_{\text{ст2}}), \quad (5)$$

- тепла, передаваемого от горячей стенки труб к жидкости

$$Q_{\text{ж}} = \alpha_2 \Delta F_{\text{вн}} (t_{\text{ст2}} - t_{\text{j-1}}) \quad (6)$$

где α_1 и α_2 - соответственно, коэффициенты теплоотдачи от водяного пара к стенке труб и от стенок труб к жидкости, Вт/(м²°C); $\lambda_{\text{ст}}$ - коэффициент теплопроводности материала труб, Вт/(м °C); $t_{\text{кн}}$ - температура конденсации водяного пара, °C; $t_{\text{ст1}}$ и $t_{\text{ст2}}$ - соответственно, температура наружной и внутренней поверхности стенок труб, °C; $\delta_{\text{ст}}$ - толщина стенки труб, м; $F_{\text{нр}}$, $F_{\text{вн}}$ и $F_{\text{ср}}$ - соответственно, поверхность теплопередачи (м²) трубного пучка аппарата по диаметру теплопередающих труб (м): наружного $d_{\text{нр}}$, внутреннего $d_{\text{вн}}$ и среднего $d_{\text{ср}} = 0,5(d_{\text{вн}} + d_{\text{нр}})$, $F_{\text{нр}} = \pi d_{\text{нр}} n \Delta h$; $F_{\text{вн}} = \pi d_{\text{вн}} n \Delta h$ и $F_{\text{ср}} = \pi d_{\text{ср}} n \Delta h$; n - количество труб в аппарата, шт.

В силу этого, сложив уравнения (4), (5) и (6)

$$\begin{cases} Q_{\text{вп}} = \alpha_1 \Delta F_{\text{нр}} (t_{\text{кн}} - t_{\text{ст1}}), \\ + \\ Q_{\text{ст}} = (\lambda_{\text{ст}} / \delta_{\text{ст}}) \Delta F_{\text{ср}} (t_{\text{ст1}} - t_{\text{ст2}}), \\ Q_{\text{ж}} = \alpha_2 \Delta F_{\text{вн}} (t_{\text{ст2}} - t_{\text{j-1}}), \end{cases}$$

и после ряда преобразований [10] получим

$$Q(1/\alpha_1 + \lambda_{\text{ст}}/\delta_{\text{ст}} + 1/\alpha_2) = \Delta F_{\text{ср}} (t_{\text{кн}} - t_{\text{j-1}}). \quad (7)$$

Откуда

$$Q = (1/\alpha_1 + \lambda_{\text{ст}}/\delta_{\text{ст}} + 1/\alpha_2)^{-1} \Delta F_{\text{ср}} (t_{\text{кн}} - t_{\text{j-1}}), \quad (8)$$

где $(1/\alpha_1 + \lambda_{\text{ст}}/\delta_{\text{ст}} + 1/\alpha_2)^{-1} = K$ является известным выражением коэффициента теплопередачи в аппарате [12,18].

Следовательно, количество передаваемого к потоку мисцеллы тепла водяного пара посредством теплопередачи в аппарате выражается как

$$Q_{\text{вп}} = K \Delta F_{\text{ср}} (t_{\text{кн}} - t_{\text{j-1}}) = K \pi d_{\text{ср}} n \Delta h (t_{\text{кн}} - t_{\text{j-1}}). \quad (9)$$

С учетом (9) уравнения теплового баланса выпаривания мисцеллы (3) в элементарном участке вертикальных труб с высотой Δh можно записать в следующем виде

$$G_{j-1}c_{j-1}t_{j-1} + W_{j-1}i_{j-1} + K\Delta F(t_{\text{кн}} - t_{j-1}) = G_j c_j t_j + W_j i_j, \quad (10)$$

или

$$G_{j-1}c_{j-1}t_{j-1} + W_{j-1}i_{j-1} - G_j c_j t_j - W_j i_j = -K\Delta F(t_{\text{кн}} - t_{j-1}) \quad (11)$$

Учитывая текущие расходы концентрируемой мисцеллы

$$G = G_o(a_o/a) \quad (12)$$

и выделяемых паров растворителя

$$W = G_o(1 - a_o/a), \quad (13)$$

определяемые из уравнения материального баланса процесса, выражение (11) можно написать в виде

$$G_o(a_o/a_{j-1})c_{j-1}t_{j-1} + G_o(1-a_o/a_{j-1})i_{j-1} - G_o(a_o/a_j)c_j t_j - G_o(1-a_o/a_j)i_j = -K\Delta F(t_{\text{кн}} - t_{j-1}); \quad (14)$$

или

$$G_o(a_o/a_{j-1})c_{j-1}t_{j-1} + G_o i_{j-1} - G_o(a_o/a_{j-1})i_{j-1} - G_o(a_o/a_j)c_j t_j - G_o i_j + G_o(a_o/a_j)i_j = -K\Delta F(t_{\text{кн}} - t_{j-1}),$$

где G_o - расход исходной мисцеллы, кг/с; a_o - начальная концентрация мисцеллы, % (масс.).

Вынося постоянных параметров процесса G_o и a_o за скобку получим

$$G_o a_o [c_{j-1}t_{j-1}/a_{j-1} + i_{j-1}/a_o - i_{j-1}/a_{j-1} - c_j t_j/a_j - i_j/a_o + i_j/a_j] = -K\Delta F(t_{\text{кн}} - t_{j-1}) \quad (15)$$

Произведя перегруппировку слагаемых членов (15) и учитывая выражения поверхности нагрева $\Delta F = \pi d_{\text{ср}} n \Delta h$ получим

$$G_o a_o [(i_j/a_j - c_j t_j/a_j) - (i_{j-1}/a_{j-1} - c_{j-1}t_{j-1}/a_{j-1}) - (i_j/a_o - i_{j-1}/a_o)] = -K\pi d_{\text{ср}} n \Delta h (t_{\text{кн}} - t_{j-1})$$

$$G_o a_o [(i_j - c_j t_j)/a_j - (i_{j-1} - c_{j-1}t_{j-1})/a_{j-1} - (i_j - i_{j-1})/a_o] = -K\pi d_{\text{ср}} n \Delta h (t_{\text{кн}} - t_{j-1}) \quad (16)$$

Разделив обе части (16) на Δh получим

$$G_o a_o / \Delta h [(i_j - c_j t_j)/a_j - (i_{j-1} - c_{j-1}t_{j-1})/a_{j-1} - (i_j - i_{j-1})/a_o] = -K\pi d_{\text{ср}} n (t_{\text{кн}} - t_{j-1}) \quad (17)$$

Имея в виду, что $a_j = a_{j-1} + \Delta a$ и $i_j - i_{j-1} = \Delta i$ выражения (17) можно записать в виде

$$(G_o a_o / \Delta h) [\Delta(i - ct)/\Delta a - \Delta i/a_o] = -K\pi d_{\text{ср}} n (t_{\text{кн}} - t_{j-1}) \quad (18)$$

или

$$(G_o a_o / \Delta h) [(i - ct)/a - i/a_o] = -K\pi d_{\text{ср}} n (t_{\text{кн}} - t_{j-1}) \quad (19)$$

где Δa и Δi - приращение концентрации и энтальпии.

Переходя от приращения к дифференциалу получим

$$(G_o a_o) d/dh[(i - ct)/a - i/a_o] = -K n d_{cp} n(t_{кн} - t_{j-1}) \quad (20)$$

Уравнение (20) характеризует изменения параметров процесса концентрирования мисцеллы (a и t) по высоте вертикальных труб h в предварительных дистилляторах при известных технологических ($G_o, a_o, P, P_{кн}$) и конструктивных параметрах (d, n, h).

Анализ уравнений для расчета параметров, входящих в (20) сводится к следующему. Температура кипения мисцеллы t зависит от ее концентрации a и величины абсолютного давления в аппарате P . Для расчета температуры кипения хлопковой мисцеллы при $P = 20 \div 200$ кПа рекомендована следующая математическая зависимость [8,13] с погрешностью менее 2 %:

$$t = c_o + c_1 P + c_2 a + c_3 P^2 + c_4 a^2 + c_5 P^3 + c_6 a^3 + c_7 a P + c_8 a P^2 + c_9 a^2 P \quad (21)$$

где $c_o \div c_9$ - постоянные коэффициенты уравнения.

Для крепкой мисцеллы ($a \geq 64$ %), кривая изменения температуры кипения которой по ее концентрации представляет собой крутую линию, численные значения коэффициентов (21) равняются:

$$c_o = -1082,85; c_1 = 1,809431; c_2 = 44,79217; c_3 = -0,55451 \cdot 10^{-2}; c_4 = -0,618587; c_5 = 0,107 \cdot 10^{-4}; c_6 = 0,2908 \cdot 10^{-2}; c_7 = 0,204719 \cdot 10^{-1}; c_8 = 0,49 \cdot 10^{-5}; c_9 = 0,1379 \cdot 10^{-3}.$$

Теплоемкость хлопковой мисцеллы c (кДж/кг $^{\circ}$ С) зависит от ее концентрации a и температуры t [7]:

$$c_{мц} = 0,01[229,2 - 0,624a + (0,588 - 0,00158a)t] \quad (22)$$

В соответствии с классификацией выпарных аппаратов по энтальпии вторичного пара [8] предварительные дистилляторы с восходящим потоком жидкости относят к аппаратам первой группы. Энтальпия паров растворителя i (кДж/кг), уходящих из этих аппаратов, определяется температурой кипения мисцеллы на выходе из трубок [7]:

$$i_w = 372 + 1,78 t \quad (23)$$

Температура конденсации водяного пара $t_{кн}$ определяется по справочной литературе [16], в зависимости от его давления $P_{вп}$ в греющей камере аппарата.

Коэффициент теплопередачи K в аппарате рассчитывается по известным критериальным уравнениям [12, 16, 18], используя расчетно-экспериментальных данных.

Сведя вышеприведенные уравнения (20), (21), (22) и (23) в систему, получим следующую математическую модель статики процесса предварительной дистилляции мисцеллы хлопкового масла в вертикальном трубчатом аппарате, работающий с восходящей пленкой жидкости:

$$\begin{cases} (G_o a_o) d/dh[(i - ct)/a - i/a_o] = -K n d_{cp} n(t_{кн} - t_{j-1}) & (20) \\ t = c_o + c_1 P + c_2 a + c_3 P^2 + c_4 a^2 + c_5 P^3 + c_6 a^3 + c_7 a P + c_8 a P^2 + c_9 a^2 P & (21) \\ c_{мц} = 0,01[229,4 - 0,624a + (0,588 - 0,00158a)t] & (22) \\ i = 372 + 1,78 t, & (23) \end{cases}$$

$$a_j \leq a_{\text{зад}} \text{ при } t_j \leq t_{\text{огр}} \quad (24)$$

Данная модель статики исследуемого процесса дает возможность изучать и анализировать характер распределения температуры и концентрации мисцеллы по высоте кипяtilьных труб дистилляторов и на этой основе спроектировать новые аппараты с оптимальной поверхностью нагрева или же выявить степени эффективности эксплуатации существующих конструкций предварительных дистилляторов, например, таких как НД-1250, ТДА-8, «Extraktionstecnik» и др., применяемые на предприятиях масло-жировой отрасли [15,4,17].

Предложенная выше модель статики процесса предварительной дистилляции мисцеллы (20 – 24) реализуется по следующему алгоритму.

1. Задаются численные значения конструктивно-технологических параметров аппарата: диаметр кипяtilьных труб d , их общее число n в аппарате, расход мисцеллы (производительность аппарата) G_o , ее начальная концентрация a_o , рабочее давление в аппарате P и давление водяного пара $P_{\text{вп}}$ в его межтрубном пространстве (или температура его конденсации $t_{\text{кн}}$).

2. Подставляя значения концентрации мисцеллы a и давления P в (21), определяют температуру ее кипения t .

3. По значениям концентрации a и температуры t рассчитывают значения теплоемкости мисцеллы c по (22).

4. Подставляя значения температуры кипения t мисцеллы в (23) определяют величину энтальпии паров растворителя i_w при этой температуре.

5. Используя опытные данные, задается значение коэффициента теплопередачи в аппарате K или его значение может быть рассчитано в зависимости от гидродинамического режима потока мисцеллы в трубках [8,12, 16, 18], с учетом непрерывного изменения показателей свойств мисцеллы и растворителя от температуры процесса.

6. Подставляя значения G_o , a_o , a , t , $t_{\text{кн}}$ и K в (20) определяется соответствующая высота участка теплопередающих трубок Δh_j , где $j = 1, 2, 3, \dots, N$, и $\Sigma \Delta h_j = h_{\text{общ}}$.

7. Задается величина приращения концентрации мисцеллы $\Delta a = a_j - a_{j-1}$.

8. С учетом прироста концентрации $a_j = a_{j-1} + \Delta a$, проверяя соблюдения условий ограничения по температуре мисцеллы на выходе из аппарата $t_j < t_{\text{огр}}$ (24) производится повторный расчет с пункта 2 по пункту 8.

9. При заданных значениях рабочего давления в аппарате P расчет ведут до достижения регламентированной величины концентрации мисцеллы $a_j \leq a_{\text{зад}}$.

Данная методика расчета основывается на учете непрерывного температурного изменения показателей свойств хлопковой мисцеллы и растворителя в паровом и жидком фазах. Такое уточнение параметров процесса способствует разработке энергетически оптимальной поверхности теплопередачи трубчатых дистилляторов.

При проектировании энергетически оптимальной конструкции трубчатого дистиллятора, с учетом ограничений по производительности G_o и температуре выпариваемой мисцеллы t_j , в качестве критерия оптимальности выбирается его минимальная теплопередающая поверхность F_{min} [8,13]:

$$R_{\text{опт}} \rightarrow \min F(d_{\text{вн}}, n, h) \quad (25)$$

при известных значениях диаметра $d_{\text{вн}}$, числа труб n и высоты трубок h в аппарате.

Поскольку оптимальная поверхность нагрева аппарата выражается как $F_{\text{опт}} = \pi d_{\text{вн}} n h_{\text{опт}}$, то при достижении $t_j = t_{\text{опт}}$ устанавливается равнозначная ей оптимальная высота трубок $h_{\text{опт}}$, соответствующей заданным значениям конструктивных ($d_{\text{вн}}$, n) и технологических параметров (G_o , a_o , P , $a_{\text{опт}}$, $t_{\text{опт}}$) процесса.

Для исследования статики предварительной дистилляции мисцеллы хлопкового масла в трубчатых аппаратах на ее математической модели составлена компьютерная модель процесса на платформе MATLAB/Simulink (см. рис. 2).

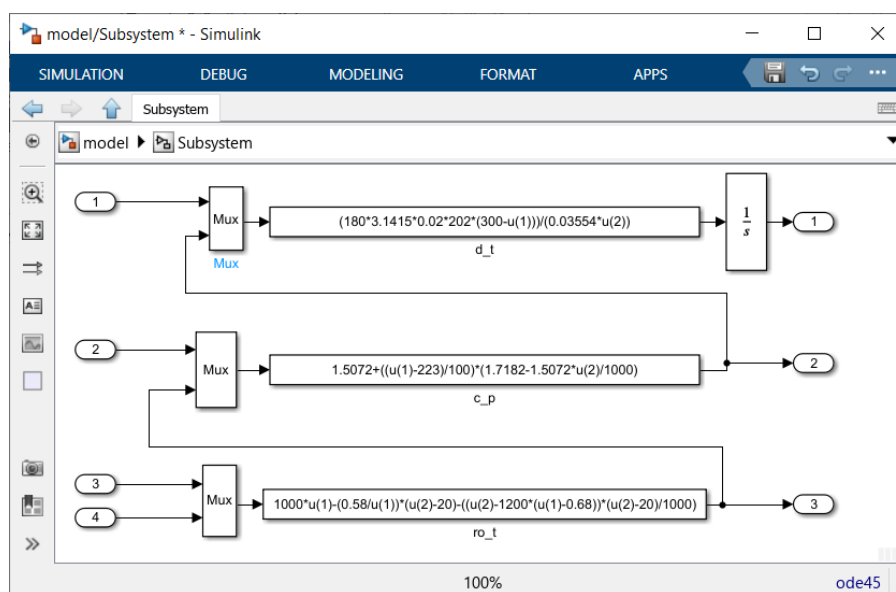


Рисунок 2. Компьютерная модель статики процесса выпаривания хлопковой мисцеллы в трубчатом аппарате на платформе MatLab Simulink

Результаты и обсуждение

На компьютерной модели была исследована статика процесса концентрирования мисцеллы хлопкового масла в трубчатом пленочном испарителе третьей ступени дистилляции экстракционной установки «Extraktionstecnik» предприятия АО «Гулистан экстракт-ёг» [17].

Промышленный аппарат в основном состоит из вертикального цилиндрического корпуса, вмонтированного в нем пучка теплопередающих трубок, камеры для распределения исходной мисцеллы по трубкам и встроенного верхнего цилиндрического сепаратора для разделения образованной парожидкостной смеси под действием сил тяжести [15,17]. В межтрубное пространство (греющей камеры) аппарата подается насыщенный водяной пар.

Согласно технологическому регламенту производства продукции в установке [17] аппарат имеет следующие конструктивные параметры: $F = 100 \text{ м}^2$; $d_{\text{вн}} = 0,03 \text{ м}$, $n = 224 \text{ шт}$ и $h = 4,6 \text{ м}$.

Процесс дистилляции мисцеллы в данном аппарате исследован при следующих регламентированных технологических параметрах процесса [17]: расход поступающей в аппарат мисцеллы $G_o = 3,31 \text{ т/ч}$ ($0,92 \text{ кг/с}$), ее концентрация $a_o = 60 \div 65 \text{ \% (масс.)}$

и температура $t_0 = 60 \div 70$ °С; мисцелла в аппарате концентрируется до $a_{\text{вых}} \geq 95$ % при температуре $t_{\text{вых}} = 100 \div 115$ °С; рабочее давления в аппарате равно $P = 50$ кПа, а давления насыщенного водяного пара в его межтрубном пространстве аппарата составляет $P_{\text{вп}} = 0,5$ МПа. Исходя из промышленной практики эксплуатации предварительных дистилляторов на масложировых предприятиях и результатов исследований авторов, среднее расчетное значение коэффициента теплопередачи в аппарате принимается равным $K = 300$ Вт/(м²°С) [7,8,13,2].

По результатам исследования процесса на компьютерной модели построены кривые распределения концентрации a (% масс.) и температуры t (°С) хлопковой мисцеллы по высоте пучка труб h предварительного дистиллятора-испарителя при указанных выше регламентированных технологических режимах процесса, (см. рис. 3 и 4).

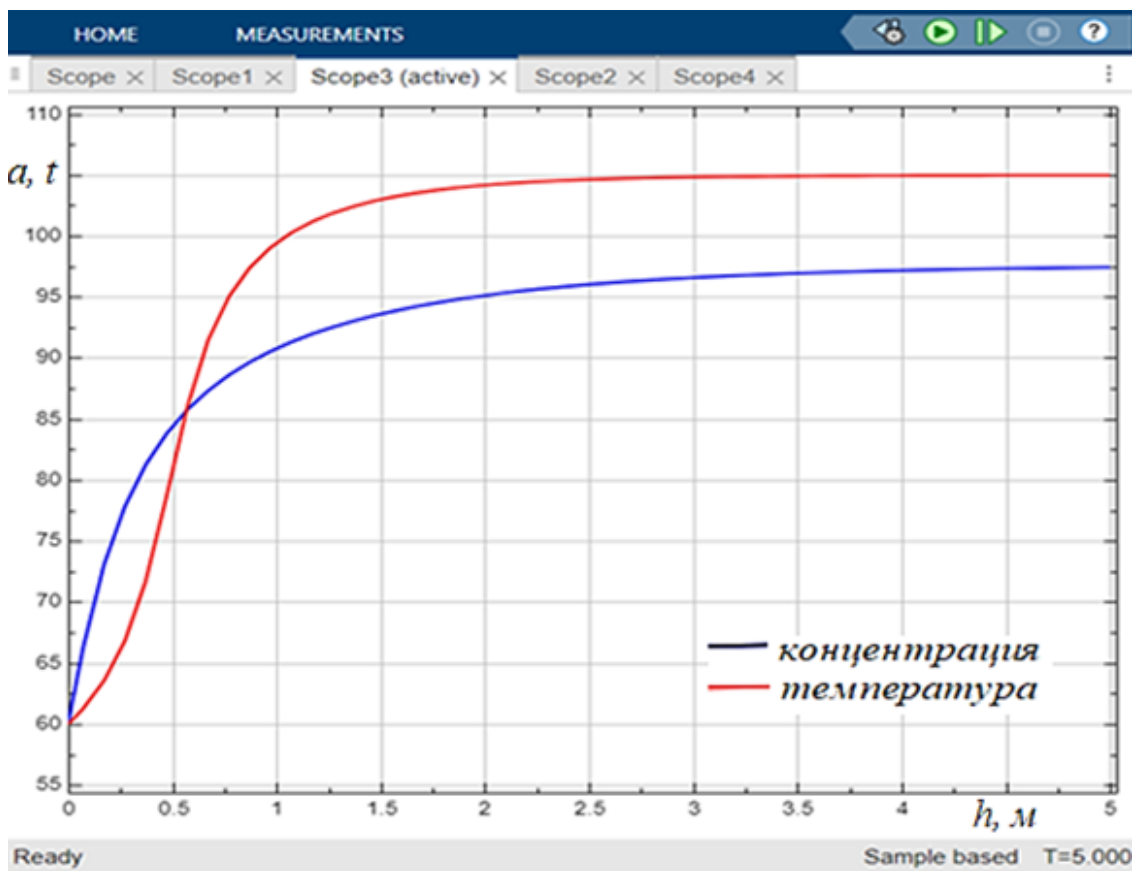


Рисунок 3. Распределение концентрации a и температуры t хлопковой мисцеллы по высоте пучка труб h испарителя при $G_0 = 0,92$ кг/с, $a_0 = 60$ %, $t_0 = 60$ °С, $P = 50$ кПа, $t_{\text{кн}} = 151$ °С и $K = 300$ Вт/(м²°С), $t_{\text{вых}} \leq 110$ °С

Из рис.3 видно, что при поступлении исходной мисцеллы в теплообменные трубки происходит ее подогрев до температуры кипения. При этом температура упариваемой в трубках мисцеллы параболически повышается и на участке трубного пучка высотой $h \leq 2,5$ м достигает до 105 °С. Интенсивность подъема температуры мисцеллы в участках труб составляет соответственно, на участке с высотой до $h \leq 1$ м – 39 °С/м, а на участке труб высотой от 1 до 2 м – 4÷5 °С/м. В дальнейшем, с приближением температуры мисцеллы к температуре конденсации греющего водяного пара, в концевых участках труб изменения концентрации и температуры снижается и достигается постоянный температурный перепад

в 46 °С между теплоносителями. В этих условиях концентрация мисцеллы по высоте трубок аппарата плавно повышается от 60 до 97,5 %. При этом темп повышения концентрации мисцеллы в участках трубного пучка составляет соответственно, на участке труб с высотой до $h \leq 1$ м – 31 %/м, на высоте труб от 1 до 2 м – 4÷5 %/м, на высоте от 2 до 3 м – 2 %/м и от 3 м и выше – менее 1 %/м.

Из рис. 3 также видно, что для концентрирования хлопковой мисцеллы до $a_{\text{вых}} = 97,5$ % при температуре $t_{\text{вых}} = 105$ °С достаточным является участок трубного пучка с активной высотой $h_{\text{акт}} = 3,5 \div 4$ м, что составляет 76÷87 % от общей высоты пучка кипяtilьных труб в аппарате. Как видим, основной процесс выпаривания мисцеллы происходит на участке трубного пучка высотой $h \leq 4$ м (или $F_{\text{min}} = 85$ м²), а остальная его часть (0,6÷1,1 м) при заданном расходе смеси работает в холостую и по сути является резервом для дальнейшего повышения производительности аппарата.

Из рис. 4 видно, что температура кипения мисцеллы в трубках испарителя плавно повышается от 70 °С до 105 °С с нарастающей скоростью и на участке трубного пучка высотой $h = 2,5$ м, что составляет 54,3 % от общей его высоты. При этом интенсивность повышения температуры мисцеллы в трубках составляет соответственно, на участке с высотой до $h \leq 1$ м – 32 °С/м, на участке труб высотой от 1 до 2 м – 2 °С/м, а ближе к точке температурного равновесия ($h \geq 2$ м) – менее 1 °С/м. В дальнейшем, с достижением постоянного перепада

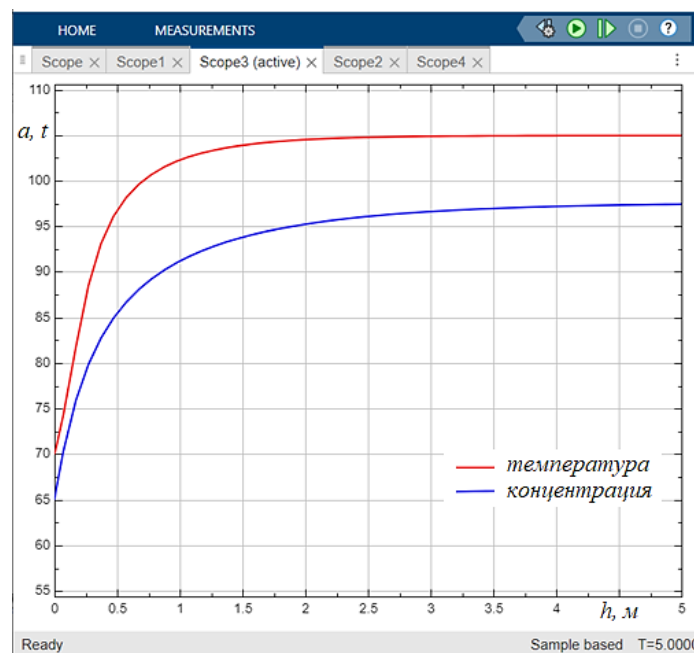


Рисунок 4. Распределение концентрации a и температуры кипения t хлопковой мисцеллы по высоте пучка труб h испарителя при $G_0 = 0,92$ кг/с, $a_0 = 65$ %, $t_0 = 70$ оС, $P = 50$ кПа, $t_{\text{кн}} = 151$ оС, $K = 300$ Вт/(м²оС) и $t_{\text{вых}} \leq 115$ оС температур между теплоносителями, темп изменения температуры мисцеллы на оставшейся части труб (от 2,5 до 4,6 м) уменьшается и приобретает постоянный характер

Как видим, основной процесс концентрирования мисцеллы от 65 до 97,5 % происходит на участке трубчатки высотой $h \leq 3,5$ м, а остальная ее часть работает в холостую, что указывает на недостаточное использование тепловой мощности испарителя. Отсюда следует, что при заданной производительности испарителя по мисцелле $G_o = 3310$ кг/ч необходимая поверхность теплопередачи составляет $F_{\text{рас}} = 76 \text{ м}^2$.

Отметим также, что идентичный характер кривых распределения параметров мисцеллы в обоих вариантах исследования свидетельствует о высокой интенсивности отгона растворителя при организации выпаривания в восходящей пленке.

Сравнение результатов в обоих вариантах исследования предварительной дистилляции хлопковой мисцеллы показали, что для выпаривания $G_o = 3,31$ т/ч мисцеллы до $a_{\text{вых}} \geq 97,5$ % при $t_{\text{вых}} \leq 110-115$ °С необходимая высота трубного пучка испарителя составляет $h_{\text{акт}} = 3,5 \div 4,0$ м (76÷87 % от его общей высоты – 4,6 м). В связи с этим, для повышения эффективности работы аппарата рекомендуем увеличить расход мисцеллы на 13÷24 %, в соответствии с выявленным запасом поверхности нагрева (24 м²), что способствует растяжению активной зоны выпаривания смеси по всей высоты трубного пучка.

Заключение

Таким образом, предварительные результаты исследования статистики выпаривания мисцеллы хлопкового масла в трубчатом испарителе с восходящей пленкой жидкости показали, что при заданном расходе мисцеллы $G_o = 3,31$ т/ч для достижения требуемой ее концентрации на выходе $a_{\text{вых}} \geq 95$ % при температурах $t_{\text{вых}} \leq 110 - 115$ °С потребуется 76÷84 м² активной теплопередающей поверхности аппарата. Выявлено, что повышению исходной температуры на 5 °С и концентрации мисцеллы на 5 % приводит к сокращению поверхности нагрева аппарата на 24 %. Это обстоятельство указывает на необходимость проведения дополнительных исследований по повышению технологической эффективности эксплуатируемых дистилляторов, выявлению резерва увеличения их удельной производительности или же проектированию аппаратов с компактной поверхностью теплопередачи на основе применения конструктивно-технологических методов интенсификации теплообмена при восходящей пленке жидкости.

Список литературы

1. [Электронный ресурс]. URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/19189> (дата обращения: 18.09.2026).
2. Волков С.М., Федоров А.В., Федоров А.А., Нугманов А.Х.Х., Романов Н.Н. Особенности тепломассообмена при кипении мисцеллы растительного масла в гравитационно стекающих пленках // Вестник Международной академии холода. – 2023. – № 4. – DOI: 10.17586/1606-4313-2023-22-4-91-99.
3. Кавецкий Г.Д., Васильев Б.В. Процессы и аппараты пищевой технологии. – М.: Колос, 2000. – 551 с.

4. Мхитарянц Л.А., Корнена Е.П., Мартовщук Е.В., Мустафаев С.К. [Industry technology (production of vegetable oils)]: textbook /.2009. L.A. Mkhitaryants, E.P. Kornena, E.V. Martovshchuk, S.K. Mustafayev; under the general editorship of E.P. Kornena. – St. Petersburg: GIORД, [In Russ]. – St. Petersburg: GIORД, 2009. – 352 P.
5. Пласкин Ю.М., Малахов Н.Н., Ларин В.А. Процессы и аппараты пищевых производств. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: КолосС, 2007. – 760 с.
6. С.В. Бутова, И.А. Сорокина, Н.В. Королькова, М.Н. Шахова. Расчеты оборудования масложировой промышленности: учебное пособие. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2017. – 151 с.
7. Хамдамов М.Б., Худайбердиев А.А. Методология построения математической модели процесса дистилляции хлопковой мисцеллы в трубчатом аппарате с восходящей пленкой жидкости // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. – 2025. – DOI: 10.32743/UniTech.2025.130.1.19189.
8. Artikov A.A. [Food production processes and equipment. Mathematical modeling. Heat exchange processes. Evaporation.].1983. – Tashkent, – 121 P. [In Russ].
9. Artikov A. [Introduction to systems thinking and analysis.]. 2017. – Tashkent: TKTI, – 35 P. [In Uzb].
10. Artikov A. [Computer methods of analysis and synthesis of chemical-engineering systems]: textbook for master's students of technological specialties. 2012. – Tashkent: – 160 P. [In Russ].
11. Erickson D.R. (Ed.) Practical Handbook of Soybean Processing and Utilization. AOCS Press. – 2023.
12. Kasatkin A.G. [Basic processes and apparatuses of chemical engineering]: Textbook for universities. – 10th ed., stereotyped, revised. Reprinted from the 1973 ed. [In Russ]. – М.: ООО TID «Alliance», 2004. – 783 P.
13. Khudaiberdiev A.A. [Intensification of the process of heating petroleum feedstock]. Monograph. 2019. – Tashkent: – 213 P. [In Russ].
14. Khudayberdiev A.A., Xamdamov M.B. [On the principles of modeling the process of distillation of cottonseed oil miscella in a tubular apparatus] // «Chemical technologies, problems of the chemical and food industries and ways to solve them.» Collection of materials of the international scientific and industrial complex. Part 2. – 2022.
15. Koshevoy E.P. [Technological equipment for the production of vegetable oils]: a textbook for universities / E.P. Koshevoy. – 2nd ed., corrected and supplemented. – М. Yurait, 2017. – 365 P. [In Russ].
16. Pavlov K.F., Romankov P.G., Noskov A.A. [Examples and problems in the course of processes and apparatuses of chemical engineering.] Textbook for universities / Ed. P.G. Romankov. – 10th ed., revised and enlarged. [In Russ]. – L.: Chemistry, 1987. – 576 P.
17. Production process regulations for the production of cottonseed oil and meal using the pre-pressing-extraction scheme at the Ekstrakttechnik extraction plant with a capacity of 900 tons/day for processing cotton seeds at Guliston Ekstrakt Yog JSC. Vol. 1. TR 16472899-001:2016. [In Uzb].

18. V.G. Einstein, M.K. Zakharov, G.A. Nosov et al. [General course of processes and apparatuses of chemical engineering]: Textbook. In 2 books. – Moscow: Logos, 2002. – 1758 P.

References

1. – URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/19189> (дата обращения: 18.09.2026). (In Russ.)
2. Volkov S.M., Fedorov A.V., Fedorov A.A., Nugmanov A.Kh.Kh., Romanov N.N. [Features of heat and mass transfer during boiling of plant oil micelle in gravity-flowing films] // Vestnik Mezhdunarodnoj akademii kholoda. – 2023. – No. 4. – DOI: 10.17586/1606-4313-2023-22-4-91-99. (In Russ.)
3. Kavetskij G.D., Vasil'ev B.V. [Processes and apparatus of food technology]. – М.: Kolos, 2000. – 551 s (In Russ.)
4. Мхитарянц Л.А., Корнена Е.П., Мартовщук Е.В., Мустафаев С.К. [Industry technology (production of vegetable oils)]: textbook /.2009. L.A. [Mkhitaryants, E.P. Kornena, E.V. Martovshchuk, S.K. Mustafayev; under the general editorship of E.P. Kornena]. – St. Petersburg: GIOR, [In Russ]. – St. Petersburg: GIOR, 2009. – 352 P (In Russ.)
5. Plaskin Yu.M., Malakhov N.N., Larin V.A. [Processes and apparatus of food production. 2nd edition, revised and supplemented]. – М.: KolosS, 2007. – 760 s (In Russ.)
6. [Butova, I.A. Sorokina, N.V. Korolkova, M.N. Shakhova. Calculations of equipment for the oil and fat industry: educational manual]. – Voronezh: FGBOU VO Voronezhskij GAU, 2017. – 151 s (In Russ.)
7. Khamdamov M.B., Khudajberdiev A.A. [Methodology for constructing a mathematical model of the distillation process of cotton micelle in a tubular apparatus with ascending liquid film] // Universum: tekhnicheskie nauki: elektron. nauchn. zhurn. – 2025. – DOI: 10.32743/UniTech. 2025.130.1.19189. (In Russ.)
8. Artikov A.A. [Food production processes and equipment. Mathematical modeling. Heat exchange processes. Evaporation.].1983. – Tashkent, – 121 P. [In Russ].
9. Artikov A. [Introduction to systems thinking and analysis.]. 2017. – Tashkent: TKTI, – 35 P. [In Uzb].
10. Artikov A. [Computer methods of analysis and synthesis of chemical-engineering systems]: textbook for master's students of technological specialties. 2012. – Tashkent: – 160 P. [In Russ].
11. Erickson D.R. (Ed.) Practical Handbook of Soybean Processing and Utilization. AOCS Press. – 2023.
12. Kasatkin A.G. [Basic processes and apparatuses of chemical engineering]: Textbook for universities. – 10th ed., stereotyped, revised. Reprinted from the 1973 ed. [In Russ]. – М.: ООО TID «Alliance», 2004. – 783 P.
13. Khudaiberdiev A.A. [Intensification of the process of heating petroleum feedstock]. Monograph. 2019. – Tashkent: – 213 P. [In Russ].

14. Khudayberdiev A.A., Xamdamov M.B. [On the principles of modeling the process of distillation of cottonseed oil miscella in a tubular apparatus] // «Chemical technologies, problems of the chemical and food industries and ways to solve them.» Collection of materials of the international scientific and industrial complex. Part 2. – 2022.
15. Koshevoy E.P. [Technological equipment for the production of vegetable oils]: a textbook for universities. – 2nd ed., corrected and supplemented. – M. Yurait, 2017. – 365 P. [In Russ].
16. Pavlov K.F., Romankov P.G., Noskov A.A. [Examples and problems in the course of processes and apparatuses of chemical engineering.] Textbook for universities. – 10th ed., revised and enlarged. [In Russ]. – L.: Chemistry, 1987. – 576 P.
17. Production process regulations for the production of cottonseed oil and meal using the pre-pressing-extraction scheme at the Ekstrakttechnik extraction plant with a capacity of 900 tons/day for processing cotton seeds at Guliston Ekstrakt Yog JSC. Vol. 1. TR 16472899-001:2016. [In Uzb].
18. V.G. Einstein, M.K. Zakharov, G.A. Nosov et al. [General course of processes and apparatuses of chemical engineering]: Textbook. In 2 books. – Moscow: Logos, 2002. – 1758 P.

Статья поступила в редакцию: 13.09.2026

Статья принята к публикации: 20.09.2026

Статья опубликована: 28.09.2026

УДК 664.1+615.32

Оптимизация состава функционального напитка целевого назначения на основе морковного сока и настоев из лекарственного растительного сырья

Ҳабибуллаев Назаржон Акрамович

докторант

Бухарский государственный технический университет

Республика Узбекистан, г. Бухара

E-mail: nazarjon192@mail.ru

Амонова Зубайда Мукимовна

канд. техн. наук, доц.

Бухарский государственный технический университет

Республика Узбекистан, г. Бухара

E-mail: amonovazubayda@bk.ru

Optimization of composition of functional beverage based on carrot juice and medicinal plant infusions

Habibullayev Nazarjon Akramovich

PhD student

Bukhara State Technical University

Uzbekistan, Bukhara

Amonova Zubayda Mukimovna

candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Bukhara State Technical University

Uzbekistan, Bukhara

Аннотация

В статье представлена оптимизация состава функционального напитка целевого назначения на основе морковного сока и водных настоев лекарственного растительного сырья — ромашки аптечной, чабреца и девясила высокого. Цель исследования заключалась в установлении рационального соотношения компонентов с учётом органолептических характеристик, содержания биологически активных веществ и антиоксидантной активности напитка. В качестве основного сырья использовали морковный сок сорта «Nantes», а растительные настои предварительно смешивали в соотношении 1:1:1. Исследовали пять вариантов рецептуры, различавшихся соотношением морковного сока, смеси растительных настоев и воды. Органолептическую оценку проводили с участием семи дегустаторов по пятибалльной шкале. Для оценки влияния рецептурных факторов использовали методы

Библиографическое описание: Ҳабибуллаев Н.А., Амонова З.М. Оптимизация состава функционального напитка целевого назначения на основе морковного сока и настоев из лекарственного растительного сырья // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 9(150). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23446>

планирования эксперимента, квадратичные регрессионные модели и функцию желательности Харрингтона. В качестве основных откликов рассматривали органолептическую оценку, содержание β -каротина и антиоксидантную активность. По результатам сравнительной оценки наиболее высокие органолептические показатели установлены для образца, содержащего 72,0 % морковного сока и по 4,0 % настоя ромашки аптечной, чабреца и девясила высокого. Проведено сравнительное исследование вкуса, аромата, цвета и консистенции исходного морковного сока и разработанного напитка. Представлены данные о химическом составе продукта и изменении содержания витамина С и β -каротина в процессе холодильного хранения. Полученные результаты могут быть использованы для научного обоснования рецептуры и последующей технологической проработки напитка целевого назначения.

Abstract

The article presents the optimization of the formulation of a functional beverage intended for a specific purpose, based on carrot juice and aqueous infusions of medicinal plant materials—German chamomile, thyme, and elecampane. The aim of the study was to determine an appropriate ratio of components, taking into account the beverage's sensory characteristics, bioactive compound content, and antioxidant activity. Juice from carrots of the 'Nantes' cultivar was used as the primary raw material, while the herbal infusions were premixed at a ratio of 1:1:1. Five formulations differing in the proportions of carrot juice, the herbal infusion blend, and water were investigated. Sensory evaluation was conducted by seven panelists using a five-point scale. Experimental design methods, quadratic regression models, and Harrington's desirability function were used to assess the effects of formulation factors. The main response variables were the sensory score, β -carotene content, and antioxidant activity. Comparative evaluation showed that the sample containing 72.0 % carrot juice and 4.0 % each of German chamomile, thyme, and elecampane infusions achieved the highest sensory scores. A comparative assessment of the taste, aroma, color, and consistency of the original carrot juice and the developed beverage was conducted. Data on the chemical composition of the product and changes in vitamin C and β -carotene contents during refrigerated storage are presented. The findings may be used to provide a scientific basis for the formulation and subsequent technological development of the beverage intended for a specific purpose.

Ключевые слова: функциональный напиток, морковный сок, водный настой ромашки, чабреца и девясила, оптимизация состава, функция желательности.

Keywords: Functional drink, carrot juice, water infusion of chamomile, thyme and elecampane, composition optimization, desirability function.

Введение

Современные дети, особенно школьного возраста, подвержены значительным психоэмоциональным нагрузкам, обусловленным целым комплексом различных факторов: интенсификация учебного процесса, повсеместное использование цифровых технологий (смартфоны, социальные сети), ростом диагностируемых случаев синдрома дефицита внимания и гиперактивности (СДВГ). Данный синдром является одним из наиболее распространённых нейроповеденческих расстройств детского возраста, затрагивающим, по

различным оценкам, от 5,0 до 10,0 % детей школьного возраста [10, с. 59-62]. По данным Всемирной организации здравоохранения, СДВГ является третьим по распространённости психическим расстройством после депрессии, тревожных расстройств и неврозов [15, с. 4-22]. Исследования подтверждают, что более 60,0 % учащихся средних и старших классов имеют признаки повышенной нервной возбудимости, нарушения сна и снижения когнитивных функций, что негативно сказывается на их успеваемости и социальной адаптации [9, с. 49–62]. Существующие фармакологические методы коррекции данного состояния (психостимуляторы, анксиолитики) часто имеют побочные эффекты (сонливость, привыкание) и не всегда приемлемы для длительного применения в педиатрической практике [19, с.9-16]. В связи с этим актуальным направлением является разработка немедикаментозных, относительно безопасных и доступных средств на основе натурального сырья, в частности функциональные напитки из фруктово-овощных соков, обогащенных натуральными фитодобавками с седативным и адаптогенным действием. Такие продукты позволяют сочетать гидратацию организма с поступлением биологически активных веществ (флавоноидов, эфирных масел, полифенолов и др.), мягко регулирующих нервную систему [16, с. 118–127; 25, с. 301-319].

Следовательно, разработка научно обоснованной технологии натуральных функциональных напитков для коррекции психоэмоционального состояния детей школьного возраста является актуальной задачей пищевой биотехнологии и нутрициологии. Её решение позволит создать относительно безопасный и эффективный продукт для массового использования в образовательных учреждениях и домашних условиях, способствующий снижению тревожности и возбудимости, улучшению концентрации внимания и нормализации сна у детей.

В технологии производства функциональных напитков морковный сок выступает не только как органолептическая основа, но и как богатый источник биологически активных веществ (БАВ), особенно β -каротина – провитамина А, необходимого для нормального функционирования нервной системы [11, с. 76–83]. Исследования показывают, что регулярное употребление продуктов, богатых каротиноидами, положительно влияет на когнитивные функции и концентрацию внимания [22, с. 1161-1165; 14, с. 290-301]. Физико-химические показатели сока ($\text{pH } 6,2 \pm 0,2$) позволяют создавать стабильные коллоидные системы при смешивании с водными настоями лекарственных трав, обеспечивающие синергизм БАВ. Весьма перспективными являются такие лекарственные растения, как ромашка аптечная (*Matricaria chamomilla*), чабрец (*Thymus serpyllum*) и девясил (*Inula helenium*), обладающие выраженными седативными, антиоксидантными и нейропротекторными свойствами [13, с. 412-470; 12, с. 45-53]. Флавоноиды ромашки, в частности апигенин, связываются с бензодиазепиновыми рецепторами головного мозга, оказывая мягкое седативное действие [26, с. 895-901]. Чабрец содержит фенольные соединения (тимол, карвакрол), которые действуют как корректоры вкуса и природные консерванты, обладая при этом умеренным ноотропным потенциалом, нивелирующим избыточную седацию [19, с.9-16]. Включение экстракта корней девясила обусловлено высоким содержанием инулина (до 44,0 %). С точки зрения пищевой технологии, инулин выступает как пребиотик и технологический модификатор вязкости, нормализуя микробиоценоз кишечника (ось «кишечник-мозг») [16, с.118-127]. Целью настоящего

исследования являлась оптимизация состава функционального напитка на основе морковного сока и настоев лекарственного растительного сырья для коррекции психоэмоционального состояния детей школьного возраста.

Методы и объекты исследования

Объектами исследования служили морковный сок из корнеплодов моркови столовой сорта «Nantes» (ГОСТ 33540-2015); цветки ромашки аптечной (ГОСТ 2237 – 93); трава чабреца (ФС.2.5.0049.15); корневища и корни девясила высокого (ГФ XIV, ФС.2.5.0012.15).

Настои готовили в соответствии с ГФ XIV: 10 г измельчённого сырья заливали 200 мл воды при температуре 90°C, настаивали на водяной бане 15 минут, охлаждали 45 минут, процеживали и доводили объём до 200 мл [8, с. 45–48]. Соотношение водных настоев ромашки, чабреца и девясила было принято равным 1:1:1 как оптимальное для: синергического действия компонентов без взаимного ослабления эффектов, минимизации риска гиперседации (баланс между успокаивающим действием ромашки и легким тонизирующим эффектом чабреца) и обеспечения стабильности органолептических показателей (равномерный вкусо-ароматический профиль).

Готовили 5 вариантов напитков при различных соотношения морковного сока, настоя из исследуемого лекарственного растительного сырья и воды в следующих пропорциях: образец 1 – 60:15:25, 2 – 65:12:23, 3 – 70:10:20, 4 – 72:12:16, 5 – 75:8:17. Органолептические показатели сока и напитков определяли по 5-балльной шкале. Массовую долю растворимых сухих веществ (%) – рефрактометрическим методом по ГОСТ 28562–90 [2]; моно- и дисахаридов (глюкозы, фруктозы, сахарозы) – методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) по ГОСТ 32162–2013 [3]; фруктанов (в том числе инулина) – энзиматически-спектрофотометрическим методом по АОАС 997.08 [18]; пектиновых веществ – титриметрическим методом по ГОСТ 29059-91 [4]; β-каротина – методом ВЭЖХ с УФ/ДАД-детектированием при длине волны $\lambda \approx 450$ нм по ГОСТ 32713–2014 [5]; витамина С – титриметрическим методом по ГОСТ 24556–89 [6]; витаминов В₁, В₂ и В₆ – методом ВЭЖХ по ГОСТ 34133.1–2017 [7]; магния (Mg) – методом атомно-абсорбционной спектроскопии [24, с. 437–480]. Антиоксидантную активность (АОА) определяли спектрофотометрическим методом с использованием радикала DPPH (2,2-дифенил-1-пикрилгидразил); результаты выражали в мкмоль тролокс-эквивалента на мл (мкмоль ТЭ/мл) [20, с. 25–30].

Результаты и обсуждения

Органолептическая оценка образцов напитка проводилась группой дегустаторов в составе 7 человек. Результаты представлены на рисунке 1.



Рисунок 1. Органолептическая оценка образцов функциональных напитков

Комплексный анализ органолептических характеристик пяти образцов композитной смеси, различающихся по составу (рис.1), показал, что образец 1 имеет наименьшие значения по всем критериям, средняя общая оценка составила 3,8–4,2 балла, что соответствует среднему уровню органолептической привлекательности. Наблюдаемые отклонения указывают на недостаточную сбалансированность компонентов, приводящую к неоднородности вкусового профиля и слабой выраженности аромата.

Образец 2 характеризуется улучшением всех показателей: средняя оценка повысилась до 4,1–4,3 балла. Отмечается более выраженная гармония вкуса и аромата, а также повышение воспринимаемой чистоты вкуса, что свидетельствует о более оптимальном соотношении ингредиентов.

Наиболее значимый рост органолептических показателей зафиксирован в образце 3, где средняя оценка достигла 4,4–4,6 баллов. Данный состав обеспечивает выраженный, но сбалансированный вкус, устойчивый аромат и стабильную цветовую гамму, что указывает на приближение к рецептурному оптимуму. Наилучшие результаты продемонстрировал образец 4, средняя оценка которого составила 4,7–5,0 баллов. Все органолептические параметры находятся на высоком уровне, отмечается полная гармония вкусовых и ароматических нот, отсутствие посторонних привкусов, а также оптимальная консистенция и цвет. Полученные данные позволяют считать данный состав оптимальным по совокупности потребительских характеристик. Образец 5, несмотря на сохранение высоких показателей (4,3–4,5 балла), демонстрирует тенденцию к снижению сбалансированности: усиление специфического привкуса и ослабление ароматической сложности. Это свидетельствует о выходе за пределы оптимального диапазона состава.

Для оптимизации рецептуры использовали методологию математического планирования эксперимента на основе центрального композиционного ротатбельного плана второго порядка (ЦКРП), обеспечивающего получение квадратичных регрессионных моделей с равномерной точностью предсказания во всём факторном пространстве [1, с. 137–180].

Факторами оптимизации являлись: X_1 — содержание морковного сока (60,0–80,0 %); X_2 — суммарное содержание настоев лекарственного растительного сырья (5,0–20,0 %). Указанные интервалы $X_1 = 60,0–80,0$ % и $X_2 = 5,0–20,0$ % соответствуют уровням факторной части плана. В ЦКРП дополнительно использовали звёздные точки при $\alpha = \sqrt{2}$; с учётом

центра плана $X_1 = 70,0 \%$, $X_2 = 12,5 \%$ и интервалов варьирования $\Delta X_1 = 10,0 \%$, $\Delta X_2 = 7,5 \%$ расчётные звёздные уровни составляли $X_1 = 55,86$ и $84,14 \%$, $X_2 = 1,89$ и $23,11 \%$, которые в матрице планирования округлены соответственно до 56 и 84% , $2,0$ и $23,0 \%$ [1].

Функциями отклика служили: Y_1 — органолептическая оценка (балльная шкала 1–5); Y_2 — содержание β -каротина (мг/100 мл); Y_3 — антиоксидантная активность (АОА) (мкмоль ТЭ/мл).

Таблица 1.

Матрица планирования эксперимента и результаты исследований

№ опыта	X_1 (сок, %)	X_2 (настой, %)	Y_1 (балл)	Y_2 (β -каротин)	Y_3 (АОА)	D
1	60	5,0	3,2	5,4	4,8	0,52
2	80	5,0	3,8	7,2	5,2	0,61
3	60	20,0	3,5	5,2	8,4	0,64
4	80	20,0	4,1	7,0	8,1	0,72
5	56	12,5	3,4	5,0	6,5	0,58
6	84	12,5	4,0	7,5	6,7	0,68
7	70	2,0	3,0	6,3	4,2	0,48
8	70	23,0	3,9	6,1	8,9	0,70
9	70	12,5	4,5	6,4	7,2	0,76
10	70	12,5	4,4	6,3	7,1	0,75
11	70	12,5	4,5	6,5	7,3	0,77
12	72	12,0	4,7	6,8	7,4	0,79

Примечание: Y_1 — балл; Y_2 — мг/100 мл; Y_3 — мкмоль ТЭ/мл

На основании экспериментальных данных (табл. 1) были получены регрессионные уравнения второго порядка (ЦКРП) для всех показателей качества $Y_1 - Y_3$ в натуральных переменных X_1, X_2 .

Общий вид модели:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{12}X_1X_2$$

В результате обработки экспериментальных данных методом наименьших квадратов получены регрессионные уравнения второго порядка, адекватно описывающие влияние содержания морковного сока и настоев лекарственного растительного сырья на показатели качества напитка.

Получены регрессионные уравнения

Органолептическая оценка

$$Y_1 = 2,31 + 0,045X_1 + 0,082X_2 - 0,00031X_1^2 - 0,0012X_2^2 + 0,00021X_1X_2$$

β -каротин

$$Y_2 = 1,85 + 0,072X_1 + 0,015X_2 - 0,0004X_1^2 - 0,0003X_2^2$$

Антиоксидантная активность

$$Y_3 = 2,15 + 0,035X_1 + 0,145X_2 - 0,0003X_1^2 - 0,0018X_2^2$$

Анализ коэффициентов уравнений показал, что содержание β -каротина в большей степени определяется долей морковного сока, тогда как содержание флавоноидов и антиоксидантная активность — долей растительных настоев. Органолептическая оценка зависит от сбалансированного влияния обоих факторов. Это подтверждает *синергетический эффект компонентов*.

Частные отклики Y_1 – Y_3 имеют различную размерность и направленность оптимизации. Для их интеграции применена функция желательности Харрингтона [21, с. 494-498]. Преобразование проводилось в два этапа:

1. Нормализация показателей: $d_i = f(Y_i)$
2. Агрегирование: $D = (d_1 \times d_2 \times d_3)^{1/3}$
3. где D — обобщённая функция желательности;
4. d_1, d_2, d_3 — частные функции желательности для трёх показателей качества.

Коэффициенты в уравнении D получены не напрямую, а через последовательность: эксперимент $\rightarrow$ частные функции желательности $\rightarrow$ интегральная функция $D \rightarrow$ регрессионное моделирование.

Регрессионная модель для обобщённой функции желательности имеет вид: $D = 0,45 + 0,008X_1 + 0,025X_2 - 0,00006X_1^2 - 0,0008X_2^2 + 0,0001X_1X_2$

Для расчёта коэффициента детерминации R^2 использовали формулу:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(Y_i - Y_{\text{расч}})^2}{\sum(Y_i - \bar{Y})^2}$$

Адекватность полученной регрессионной модели оценивали по критерию Фишера. Расчётное значение критерия составило $F_{\text{расч}} = 0,92$, что значительно ниже табличного значения $F_{\text{табл}} = 19,3$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$. Это свидетельствует об адекватности модели и возможности её использования для описания процесса и оптимизации рецептуры напитка. Коэффициент детерминации $R^2 = 0,94$ подтверждает высокую степень соответствия модели экспериментальным данным.

Значения коэффициентов показывают, что фактор X_2 (растительные настои) оказывает более выраженное влияние на обобщённый показатель качества по сравнению с X_1 , что обусловлено вкладом флавоноидов и антиоксидантной активности.

Анализ поверхности отклика функции желательности (рис. 2) позволил определить наличие выраженного экстремума, соответствующего оптимальной области значений факторов: $X_1 = 72$ – 73 %; $X_2 = 12$ – 14 %

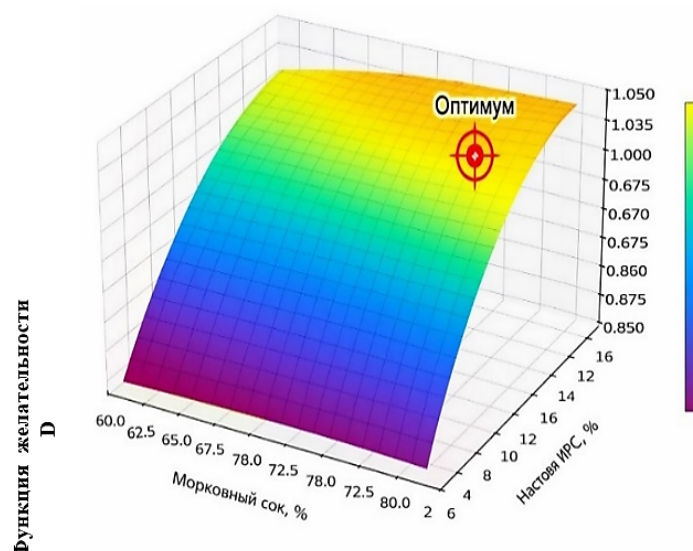


Рисунок 2. Поверхность отклика: зависимость функции желательности от содержания морковного сока и настоев ЛРС

Комплексный анализ графических зависимостей (рис. 2) позволил определить рациональные параметры рецептуры: $X_{1\text{опт}} = 72,8 \%$, $X_{2\text{опт}} = 12,6 \%$ при максимальном значении функции желательности $D_{\text{max}} \approx 0,80$.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что установленный состав обеспечивает высокий уровень органолептических показателей, повышенное содержание биологически активных веществ и выраженную антиоксидантную активность. Значение обобщённого показателя качества ($D_{\text{max}} \approx 0,80$) соответствует категории «высокое качество».

Состав оптимизированного напитка представлен на рисунке 3.

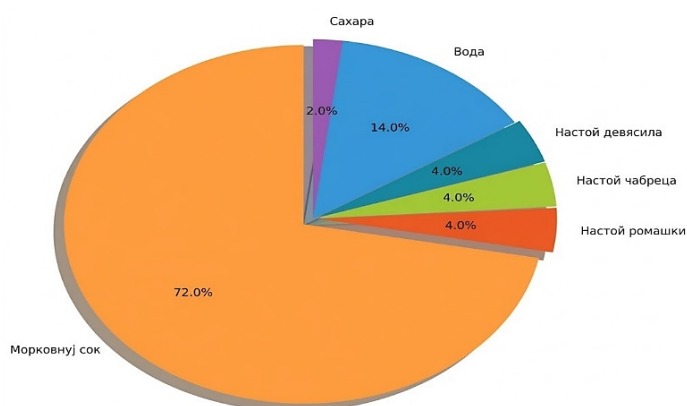


Рисунок 3. Компонентный состав оптимизированного функционального напитка

Профильная оценка напитков позволяет обосновать потребительскую привлекательность инновационного продукта (табл.2).

Таблица 2.

Сравнительная характеристика профилей

Дескриптор	Морковный сок (контроль)	Функциональный напиток (опыт)	Технологический комментарий
Сладость	Интенсивная, приторная	Умеренная, мягкая	Снижение за счёт разбавления сока и маскировки горечью

Дескриптор	Морковный сок (контроль)	Функциональный напиток (опыт)	Технологический комментарий
Аромат	Специфический «землистый»	Сложный, пряно-травяной	Эфирные масла чабреца и ромашки перекрывают овощной тон
Текстура	Жидкая, склонная к расслоению	Густая, однородная	Инулин девясила создает эффект «smoothie-like»
Терпкость	Отсутствует	Легкая, освежающая	Обусловлена дубильными веществами чабреца
Цвет	Ярко-оранжевый	Насыщенный темно-оранжевый	Экстракты углубляют цвет без потери прозрачности фаз

Установлено (табл.2), что в опытном образце сладость становится более мягкой за счёт разбавления и частичной маскировки, тогда как аромат трансформируется из «землистого» в сложный пряно-травяной благодаря эфирным маслам растительного сырья. Консистенция улучшается: вместо жидкой, склонной к расслоению системы формируется густая и однородная структура, обусловленная присутствием инулина. В функциональном напитке появляется лёгкая освежающая терпкость, связанная с дубильными веществами, а цвет становится более насыщенным тёмно-оранжевым за счёт растительных экстрактов.

Таблица 3.

Органолептическая (сенсорная) оценка качества морковного сока и функционального напитка

Показатель качества	Весовой коэффициент	Морковный сок (Контроль)	Функциональный напиток (Опыт)
Внешний вид	0,15	4,2	4,9
Запах (аромат)	0,25	3,8	4,7
Вкус	0,40	4,0	4,8
Консистенция	0,20	3,5	4,9
Итоговый балл	1,00	3,88	4,82

Прирост баллов в опытном образце практически на 24,2 % относительно чистого сока достигнут за счёт стабильности консистенции (отсутствие быстрого осадка) и гармонизации вкуса (табл.3).

Таблица 4 отражает изменения химического состава морковного сока и разработанного функционального напитка. Установлено, что в опытном образце наблюдается снижение моно- и дисахаридов, что указывает на уменьшение гликемической нагрузки продукта. Существенным отличием является присутствие инулина (2,0 г) в функциональном напитке, обеспечивающего пребиотические свойства и структурную стабилизацию. Также возрастает содержание клетчатки (пектинов), что способствует улучшению функций желудочно-кишечного тракта. Несмотря на некоторое снижение уровня β -каротина, напиток сохраняет антиоксидантную активность, при этом содержание витамина С и витаминов группы В увеличивается за счёт растительных экстрактов, что усиливает их биологическую ценность. Дополнительно отмечается рост содержания магния, оказывающего положительное влияние на нервно-мышечную регуляцию.

Таблица 4.

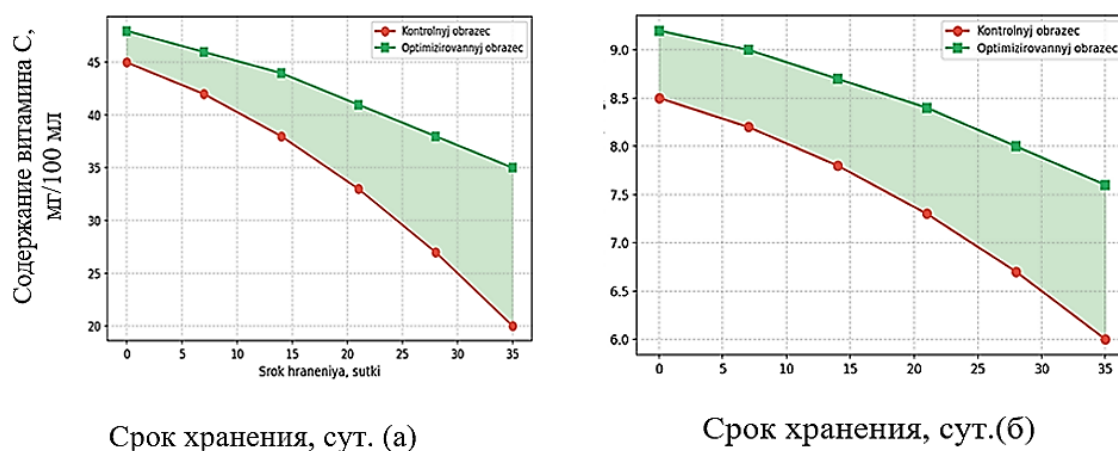
Химический состав морковного сока и функционального напитка

Группа веществ	Морковный сок (контроль)	Функциональный напиток (опыт)	Технологическая и биологическая роль
Сухие вещества (общие), %	$11,0 \pm 0,5$	$10,0 \pm 0,5$	Увеличение плотности за счет экстрактивных веществ
Моно- и дисахариды, г	$6,7 \pm 0,3$	$4,8 \pm 0,2$	Снижение гликемической нагрузки
Инулин, г	0	$2,0 \pm 0,2$	Пребиотик, стабилизатор структуры, нейрпротектор
Клетчатка (пектины), г	$0,8 \pm 0,1$	$1,2 \pm 0,1$	Улучшение моторики ЖКТ, сорбция токсинов
Бета-каротин, мг	$9,0 \pm 1,0$	$6,5 \pm 0,5$	Антиоксидант, регенерация тканей
Витамин С, мг	$5,0 \pm 0,3$	$6,2 \pm 0,2$	Повышается за счёт экстракта чабреца
Витамины группы В, мг	$0,05 \pm 0,01$	$0,12 \pm 0,01$	Укрепление миелиновых оболочек нервов
Магний (Mg), мг	$12,0 \pm 0,8$	$19,0 \pm 1,0$	Снижение нейромышечной возбудимости.

Особо следует отметить, что в разработанном напитке содержатся специфические БАВ (минорные компоненты), которые полностью отсутствуют в морковном соке, но определяют функциональность смеси для нормализации психоэмоционального состояния детей школьного возраста: флавоноидный комплекс (ромашка, чабрец), фенольные кислоты (чабрец), сесквитерпеновые лактоны (девясил).

В целом, функциональный напиток характеризуется более сбалансированным составом и повышенной биологической ценностью по сравнению с контрольным образцом.

Изучение сохранности биологически активных веществ в процессе хранения (рис. 4) показало, что оптимизированный напиток сохраняет более 70,0 % β -каротина и витамина С в течение 35 суток хранения при температуре $4 \pm 2^\circ\text{C}$, что превышает аналогичные показатели контрольного образца на 20,0–25,0 %.

Рисунок 4. Динамика содержания витамина С (а) и β -каротина (б) при хранении напитка

Полученный напиток характеризуется гармоничным сочетанием сладковато-морковного вкуса с лёгкими травяными нотами. Оранжево-жёлтый цвет и приятный аромат обусловлены высоким содержанием каротиноидов и эфирных масел лекарственных растений. Наличие флавоноидов ромашки (апигенин), тимола и карвакрола чабреца, а также алантолактона девясила обеспечивает комплексное седативное и нейропротекторное действие.

С учётом целевой аудитории дополнительно оценивали расчётную экспозицию эфиромасличных компонентов чабреца. Для расчёта принята разовая порция напитка 200 мл. При содержании настоя чабреца 4,0 % такая порция включает 8 мл настоя; при способе приготовления 10 г сырья на 200 мл воды это соответствует 0,40 г исходной травы чабреца. По опубликованным данным для *Thymus serpyllum* L. выход эфирного масла составляет 0,4–1,4 %, содержание тимола в нём — 5,11–58,25 %, карвакрола — 1,22–55,85 % [23]. Исходя из крайних значений этих диапазонов, расчётный сырьевой эквивалент на порцию 200 мл составляет ориентировочно 0,08–3,26 мг тимола и 0,02–3,13 мг карвакрола. Эти величины не являются аналитически измеренной концентрацией в готовом напитке, поскольку степень перехода летучих компонентов в водный настой не определялась; для подтверждения фактической дозы требуется количественное определение тимола и карвакрола методом ГХ-МС или ВЭЖХ. В зарегистрированной инструкции по медицинскому применению травы чабреца пероральное применение противопоказано детям до 12 лет; для детей старше 12 лет предусмотрена разовая доза 15 мл настоя, приготовленного из 4 г сырья на 100 мл воды, что соответствует примерно 0,60 г сырьевого эквивалента [17]. Таким образом, сырьевой эквивалент чабреца в одной порции разработанного напитка (0,40 г) примерно на 33 % ниже указанной разовой лекарственной дозы для возраста старше 12 лет. Это сопоставление является ориентировочным и не заменяет специальный норматив безопасности для пищевого продукта; применение напитка у детей младше 12 лет требует отдельного токсиколого-гигиенического обоснования и прямого количественного контроля тимола и карвакрола.

Заключение

Разработанная рецептура функционального напитка оптимизирована с использованием методов математического моделирования и планирования эксперимента. Установлено, что зависимость показателей качества от рецептурных факторов носит нелинейный характер и адекватно описывается квадратичными регрессионными моделями.

Применение функции желательности Харрингтона позволило интегрировать разнородные показатели качества в единый критерий оптимизации. Максимальное значение функции желательности ($D \approx 0,80$) достигнуто при содержании морковного сока 72,8 % и растительных настоев 12,6 %.

Полученный продукт характеризуется улучшенными органолептическими свойствами, повышенным содержанием биологически активных веществ и высокой антиоксидантной активностью. Установлена статистическая значимость моделей ($p < 0,05$) и высокая степень их адекватности ($R^2 = 0,94$).

Список литературы

1. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1976. – 280 с.
2. ГОСТ 28562–90. Соки плодовые и овощные. Методы определения массовой доли растворимых сухих веществ. – М.: Издательство стандартов, 1990. – 8 с.
3. ГОСТ 32167–2013. Продукты пищевые. Метод определения сахаров методом высокоэффективной жидкостной хроматографии. – М.: Стандартинформ, 2014. – 16 с.
4. ГОСТ 29059–91. Продукты переработки плодов и овощей. Титриметрический метод определения пектиновых веществ. – М.: Издательство стандартов, 1992. – 10 с.
5. ГОСТ 32713–2014. Продукция соковая. Определение каротиноидов методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ). – М.: Стандартинформ, 2015. – 14 с.
6. ГОСТ 24556–89. Продукты переработки плодов и овощей. Методы определения витамина С. – М.: Издательство стандартов, 1989. – 11 с.
7. ГОСТ 32924–2014. Продукты пищевые. Определение витамина В₁ методом высокоэффективной жидкостной хроматографии. – М.: Стандартинформ, 2015. – 12 с.
8. Государственная фармакопея Российской Федерации / Министерство здравоохранения Российской Федерации. – 14-е изд. – М.: ФЭМБ, 2018. – Т. 2. – С. 45–48.
9. Громова, О.А. Витамины, макро- и микроэлементы при синдроме дефицита внимания с гиперактивностью / О.А. Громова, И.Ю. Торшин, Н.Л. Стаховская // Лечащий врач. – 2019. – № 7.
10. Заваденко, Н.Н. Гиперактивность с дефицитом внимания у детей: современные подходы к фармакотерапии / Н.Н. Заваденко, Н.Ю. Суворинова, Н.В. Григорьева // Психиатрия и психофармакотерапия. – 2000. – № 2.
11. Исаева, Н.В. Каротиноиды в питании и их значение для здоровья / Н.В. Исаева // Вопросы питания. – 2021. – Т. 90, № 4.
12. Кузнецова, А.А. Представители семейства Lamiaceae Lindl. Как источники лекарственного растительного сырья для получения нейротропных средств (обзор) / А.А. Кузнецова, М.В. Мартынова // Разработка и регистрация лекарственных средств. – 2021. – Т. 10, № 3.
13. Куркин, В.А. Фармакогнозия: учебник для студентов фармацевтических вузов / В.А. Куркин. – 3-е изд., перераб. и доп. – Самара: Офорт, 2016. – 1279 с.
14. Кучма, В.Р. Особенности психоэмоционального состояния школьников в условиях цифровизации их жизнедеятельности / В.Р. Кучма, А.С. Седова, С.Ю. Надеждин // Санитарный врач. – 2022. – № 4.
15. Тутельян, В.А. Биологически активные вещества растительного происхождения. Флавонолы и флавоны: распространённость, пищевые источники, потребление / В.А. Тутельян, Н.В. Лашнева // Вопросы питания. – 2013. – Т. 82, № 1.

16. Хотимченко, С.А. Растительное сырье в производстве специализированной пищевой продукции: аспект безопасности / С.А. Хотимченко, В.В. Бессонов // Вопросы питания. – 2021. – Т. 90, № 4.
17. Чабреца трава: инструкция по медицинскому применению лекарственного препарата, регистрационное удостоверение Р N001718/02. – Ст.-Медифарм, Россия. – Ст.-Медифарм: Ст.-Медифарм.
18. AOAC Official Method 997.08. Fructans in food products. – Gaithersburg: AOAC International, 2005. – 4 P.
19. Biederman, J. Attention-deficit/hyperactivity disorder: a life-span perspective / J. Biederman, T. Spencer // The Journal of Clinical Psychiatry. – 1999. – Т. 60, № 22.
20. Brand-Williams, W. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity / W. Brand-Williams, M.E. Cuvelier, C. Berset // LWT. – 1995. – Т. 28, № 1.
21. Harrington, E.C. The desirability function / E.C. Harrington // Industrial Quality Control. – 1965. – Т. 21, № 10.
22. Johnson, E.J. A possible role for lutein and zeaxanthin in cognitive function in the elderly / E.J. Johnson // The American Journal of Clinical Nutrition. – 2012. – Т. 96, № 5. – DOI: 10.3945/ajcn.112.034611.
23. Kirillov, V. Composition of the Essential Oil of *Thymus serpyllum* L. from Northern Kazakhstan / V. Kirillov, T. Stikhareva, B. Mukanov [et al.] // Journal of Essential Oil Bearing Plants. – 2016. – Т. 19, № 1. – DOI: 10.1080/0972060X.2015.1010600.
24. Montgomery, D.C. Design and Analysis of Experiments / D.C. Montgomery. – 8th ed. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2013. – 730 P.
25. Sarris, J. Plant-based medicines for anxiety disorders, part 2: a review of clinical studies with supporting preclinical evidence / J. Sarris, D.E. McIntyre, D.A. Camfield [et al.] // CNS Drugs. – 2013. – Т. 27, № 4.
26. Srivastava, J.K. Chamomile: a herbal medicine of the past with a bright future / J.K. Srivastava, E. Shankar, S. Gupta // Molecular Medicine Reports. – 2010. – Т. 3, № 6.

References

1. Adler Yu.P. [Experimental Design in Searching for Optimal Conditions] / Yu.P. Adler, E.V. Markova, Yu.V. Granovskiy. – 2-e izd., pererab. i dop. – M.: Nauka, 1976. – 280 P. (In Russ.)
2. GOST 28562–90. [Fruit and Vegetable Juices. Methods for Determining the Mass Fraction of Soluble Dry Matter]. – M.: Izdatel'stvo standartov, 1990. – Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1990. – 8 P. (In Russ.)
3. GOST 32167–2013. [Food Products. Method for Determining Sugars by High-Performance Liquid Chromatography]. – M.: Standartinform, 2014. – M.: Standartinform, 2014. – 16 P. (In Russ.)

4. GOST 29059–91. [Processed Fruit and Vegetable Products. Titrimetric Method for Determining Pectin Substances]. – М.: Izdatel'stvo standartov, 1992. – М.: Izdatel'stvo standartov, 1992. – 10 P. (In Russ.)
5. GOST 32713–2014. [Juice Products. Determination of Carotenoids by High-Performance Liquid Chromatography (HPLC)]. – М.: Standartinform, 2015. – М.: Standartinform, 2015. – 14 P. (In Russ.)
6. GOST 24556–89. [Processed Fruit and Vegetable Products. Methods for Determining Vitamin C]. – М.: Izdatel'stvo standartov, 1989. – М.: Izdatel'stvo standartov, 1989. – 11 P. (In Russ.)
7. GOST 32924–2014. [Food Products. Determination of Vitamin B₁ by High-Performance Liquid Chromatography]. – М.: Standartinform, 2015. – М.: Standartinform, 2015. – 12 P. (In Russ.)
8. [State Pharmacopoeia of the Russian Federation] / Ministry of Health of the Russian Federation. – 14-e izd. – М.: FEMB, 2018. – Т. 2. – P. 45–48 (In Russ.)
9. Gromova O.A., Torshin I.Yu., Stakhovskaya N.L. [Vitamins, Macro- and Microelements in Attention Deficit Hyperactivity Disorder] // Lechashchiy vrach. – 2019. – No. 7. (In Russ.)
10. Zavadenko N.N., Suvorinova N.Yu., Grigor'eva N.V. [Attention Deficit Hyperactivity Disorder in Children: Modern Approaches to Pharmacotherapy] // Psikhatriya i psikhofarmakoterapiya. – 2000. – No. 2. (In Russ.)
11. Isaeva N.V. [Carotenoids in Nutrition and Their Significance for Health] // Voprosy pitaniya. – 2021. – Vol. 90, No. 4. (In Russ.)
12. Kuznetsova A.A., Martynova M.V. [Representatives of the Family Lamiaceae Lindl. As Sources of Medicinal Plant Raw Material for Obtaining Neurotropic Agents (Review)] // Razrabotka i registratsiya lekarstvennykh sredstv. – 2021. – Vol. 10, No. 3. (In Russ.)
13. Kurkin V.A. [Pharmacognosy: Textbook for Students of Pharmaceutical Universities]. – 3-e izd., pererab. i dop. – Samara: Ofort, 2016. – 1279 P. (In Russ.)
14. Kuchma V.R., Sedova A.S., Nadezhdin S.Yu. [Characteristics of Psychoemotional State of Schoolchildren under Conditions of Digitalization of Their Life Activities] // Sanitarnyy vrach. – 2022. – No. 4. (In Russ.)
15. Tutel'yan V.A., Lashneva N.V. [Biologically Active Substances of Plant Origin. Flavonols and Flavones: Prevalence, Food Sources, Consumption] // Voprosy pitaniya. – 2013. – Vol. 82, No. 1. (In Russ.)
16. Khotimchenko S.A., Bessonov V.V. [Plant Raw Material in the Production of Specialized Food Products: Safety Aspect] // Voprosy pitaniya. – 2021. – Vol. 90, No. 4. (In Russ.)
17. [Thyme Herb: Instructions for Medical Use of the Medicinal Product], Registration Certificate R N001718/02. – St.-Medifarm, Russia. – St.-Petersburg: Medifarm. (In Russ.)
18. AOAC Official Method 997.08. Fructans in food products. – Gaithersburg: AOAC International, 2005. – 4 P.
19. Biederman, J. Attention-deficit/hyperactivity disorder: a life-span perspective / J. Biederman, T. Spencer // The Journal of Clinical Psychiatry. – 1999. – Vol. 60, No. 22.
20. Brand-Williams, W. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity / W. Brand-Williams M.E. Cuvelier, C. Berset // LWT. – 1995. – Vol. 28, No. 1.

-
21. Harrington E.C. The desirability function // *Industrial Quality Control*. – 1965. – Vol. 21, No. 10.
 22. Johnson E.J. A possible role for lutein and zeaxanthin in cognitive function in the elderly // *The American Journal of Clinical Nutrition*. – 2012. – Vol. 96, No. 5. – DOI: 10.3945/ajcn.112.034611.
 23. Kirillov V., Stikhareva T., Mukanov B., Chebotko N., Ryazantsev O., Atazhanova G., Adekenov S. Composition of the Essential Oil of *Thymus serpyllum* L. from Northern Kazakhstan // *Journal of Essential Oil Bearing Plants*. – 2016. – Vol. 19, No. 1. – DOI: 10.1080/0972060X.2015.1010600.
 24. Montgomery D.C. *Design and Analysis of Experiments*. – 8th ed. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2013. – 730 P.
 25. Sarris, J. Plant-based medicines for anxiety disorders, part 2: a review of clinical studies with supporting preclinical evidence / J. Sarris, D.E. McIntyre, D.A. Camfield [et al.] // *CNS Drugs*. – 2013. – Vol. 27, No. 4.
 26. Srivastava J.K. Chamomile: a herbal medicine of the past with a bright future / J.K. Srivastava, E. Shankar, S. Gupta // *Molecular Medicine Reports*. – 2010. – Vol. 3, No. 6.

ИНФРАСТРУКТУРА И ТРАНСПОРТ

СТРОИТЕЛЬСТВО, АРХИТЕКТУРА И ЖИЛИЩНО-КОММУНАЛЬНОЕ ХОЗЯЙСТВО

Статья поступила в редакцию: 18.08.2026

Статья принята к публикации: 24.08.2026

Статья опубликована: 28.09.2026

УДК 624.17+391.9+72.01

DOI: 10.32743/UniTech.2026.150.9.23340

Связь деревянной архитектуры, древнерусских мер длины и концепции «Витрувианского человека»: историко-архитектурный анализ

Редин Алексей Сергеевич
магистрант

ФГБОУ ВО Петрозаводский государственный университет, Российская Федерация
Республика Карелия, г. Петрозаводск
E-mail: redin8787@bk.ru

The connection between wooden architecture, ancient Russian units of length, and the concept of the «Vitruvian man»: a historical and architectural analysis

Redin Alexey
Master's student, Petrozavodsk State University
Republic of Karelia, Petrozavodsk

Аннотация

В статье представлен историко-архитектурный анализ связи деревянной архитектуры Древней Руси с древнерусскими мерами длины и концепцией «Витрувианского человека», разработанной Леонардо да Винчи. Исследование фокусируется на том, как принципы пропорций и гармонии, олицетворяемые в витрувианской модели, нашли отражение в конструктивных особенностях и эстетике деревянных сооружений русского средневековья. В работе рассматриваются аналогии между традиционными мерами длины, используемыми в строительстве, и каноническими пропорциями, предложенными Витрувием.

Автор анализирует архитектурные образцы, которые иллюстрируют взаимосвязь между масштабом человеческого тела и построенными пространствами — от крестьянских изб до церковных храмов. Особое внимание уделяется взаимодействию между функциональностью

Библиографическое описание: Редин А.С. Связь деревянной архитектуры, древнерусских мер длины и концепции «Витрувианского человека»: историко-архитектурный анализ // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 9(150). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23340>

и духовной символикой, что делает деревянные памятники уникальными в контексте мировой архитектуры. В заключение подчёркивается, что исследование этой взаимосвязи не только углубляет понимание древнерусской архитектуры, но и открывает новые горизонты для интерпретации культурного наследия, показывая, как веками развивались идеи гармонии и красоты в русской архитектурной традиции. Цель статьи — проанализировать малоизученные грани архитектурного процесса и актуализировать теоретические представления о взаимосвязи формы, функции и пространства.

Abstract

The article presents a historical and architectural analysis of the connection of wooden architecture of Ancient Russia with Old Russian measures of length and the concept of «Vitruvian man» developed by Leonardo da Vinci. The study focuses on how the principles of proportion and harmony personified in the Vitruvian model were reflected in the design features and aesthetics of wooden structures of the Russian Middle Ages. The work considers analogies between the traditional measures of length used in construction and the canonical proportions proposed by Vitruvius.

The author analyzes architectural patterns that illustrate the relationship between the scale of the human body and the built spaces – from peasant huts to church churches. Particular attention is paid to the interaction between functionality and spiritual symbolism, which makes wooden monuments unique in the context of world architecture. In conclusion, it is emphasized that the study of this relationship not only deepens the understanding of ancient Russian architecture, but also opens up new horizons for the interpretation of cultural heritage, showing how the ideas of harmony and beauty have developed over the centuries in the Russian architectural tradition. The purpose of the article is to analyze little-studied facets of the architectural process and update theoretical ideas about the relationship of form, function and space.

Ключевые слова: культурное наследие, мера длины, пропорция и гармония, вековые традиции русского северного строительства, духовное отношение, функциональная составляющая деревянной архитектуры.

Keywords: cultural heritage, a measure of length, proportion and harmony, the age-old traditions of Russian northern construction, the spiritual attitude, the functional component of wooden architecture.

Введение

Древнерусская архитектура, обладая уникальными чертами и традициями, представляет собой важнейшую часть культурного наследия России. Одним из её наиболее ярких аспектов является деревянная архитектура, которая, благодаря использованию природных материалов и особым строительным технологиям, отражает гармонию между человеком и окружающей природой. Данная статья посвящена исследованию взаимосвязи между деревянной архитектурой Древней Руси, древнерусскими мерами длины и концепцией «Витрувианского человека», созданный Леонардо да Винчи в XV веке. Данная иллюстрация лежит у истоков к трудам древнеримского архитектора и инженера Витрувия, жившего во второй половине I в. до н. э. в годы правления Юлия Цезаря и императора Октавиана

Августа, автора трактата «Десять книг об архитектуре», в которой описаны идеальные пропорции человеческого тела (рис. 1). «Композиция храмов основана на соразмерности, правила которой должны тщательно соблюдать архитекторы. Она возникает из пропорции, которая по-гречески называется *ἀναλογία*» [2, с. 51].

Концепция «Витрувианского человека», основанная на идее пропорциональности человеческого тела и гармонии форм, служит важным ориентиром в архитектурной практике различных эпох и культур. В то же время, древнерусские меры длины, такие как локти и сажени, играли ключевую роль в процессе строительства и планировки жилых и культовых сооружений. Исследование этих аспектов архитектурной практики позволяет проследить, как принципы пропорций и масштаба, отражённые в концепции Витрувия, нашли своё воплощение в деревянных постройках, формируя уникальную архитектурную эстетику.

Целью данной статьи является анализ исторических и культурных взаимосвязей между указанными элементами, а также выявление их влияния на формирование архитектурной идентичности Древней Руси. Мы стремимся продемонстрировать, как традиционные представления о пропорции и гармонии, заимствованные из античной архитектуры, были адаптированы и переосмыслены в контексте русского архитектурного наследия.

Эта работа не только углубляет понимание взаимосвязи между архитектурой и мерами длины, но и открывает новые горизонты для интерпретации культурного наследия, показывая, как веками развивались идеи гармонии и красоты в русской архитектурной традиции.

Материалы и методы

В рамках данной статьи предлагается комплексный подход к изучению взаимосвязи между деревянной архитектурой Древней Руси, древнерусскими мерами длины и концепцией «Витрувианского человека». Методология исследования включает несколько этапов, которые обеспечат глубокий и многогранный анализ изучаемой темы.

На первом этапе исследования проведён историко-архитектурный анализ, который подразумевает систематическое изучение источников по архитектуре Древней Руси. Используются следующие источники: архивные материалы, исследование древних документов, хроник и летописей, которые содержат сведения о строительных практиках, традициях и различных архитектурных формах, а также источников советской литературы, в которых подробно рассмотрен вопрос обмеров при реставрации.

По специфике архитектурных стилей проведён анализ сохранившихся деревянных памятников архитектуры, таких как храмы, часовни, дома и крепости. Элементы и особенности конструкции исследованы с точки зрения их функциональности и эстетики.

На следующем этапе осуществлён эмпирический подход, включающий натурные исследования, такие как проведение полевых исследований на объектах деревянной архитектуры с целью документирования и фотографирования сохранившихся зданий. Важно создать визуальную базу данных для дальнейшего анализа. Использование древнерусских мер длины для проведения сравнительного анализа с современными архитектурными стандартами и концепциями. Выполнены практические измерения архитектурных объектов для сопоставления с историческими данными (табл. 1).

Таблица 1.

Древнерусские меры длины и их соответствия

Название меры	Обозначение	Длина (см)	Примеры использования
Верста	в.	1060	Расстояние между поселениями
Пядь	п.	19,2	Размеры деталей, мебели
Аршин	а.	71,2	Строительные пропорции
Локоть	л.	59,2	Размеры дверных проёмов, окон

Данная методика активно использует сравнительный анализ, что включает сравнение архитектурных пропорций, сравнение деревянной архитектуры Древней Руси с принципами «Витрувианского человека». Особенное внимание уделено пропорциям и формам, стремление к универсальной гармонии, используемым в обоих контекстах (рис. 1).

**Рисунок 1. Рисунок Леонардо да Винчи «Витрувианский человек»**

Рисунок Леонардо да Винчи (около 1490 года) изображает мужскую фигуру в двух наложенных друг на друга позициях с разведёнными руками и сведёнными ногами, вписанную одновременно в круг и квадрат. Круг символизирует небесное и божественное начало, квадрат — земное и материальное. Таким образом, рисунок воплощает идею единства микрокосма (человека) и макрокосма (Вселенной).

Изучение интерпретаций концепции Витрувия приводит к анализу того, как идеи Витрувия адаптировались в русском строительстве и как это сказалось на восприятии гармонии и пропорциональности в архитектурных формах.

Антропометрическая основа в деревянном зодчестве Древней Руси с «Витрувианским человеком» показанная на рисунке Леонардо да Винчи, имеют общий принцип. Размеры часто привязывали к частям тела (рис. 2), что позволяло мастерам «ощущать» размеры человека в процессе работы. При работах с деревом применяется геометрическая основа,

позволяющая использовать квадрат и его диагонали для проверки прямых углов и расчёта площадей без вычислений – принцип, перекликающийся с идеей вписания фигуры в геометрические формы (рис. 3)



Рисунок 2. Древнерусские меры длины

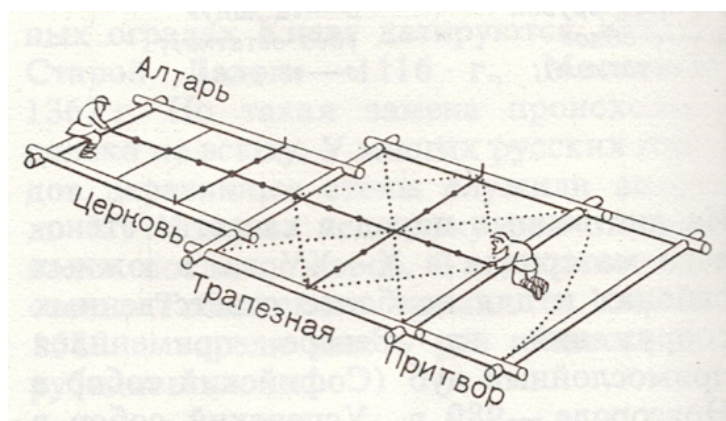


Рисунок 3. «Окладывание сруба»

Принцип геометрического подобия фасадов и деталей в деревянной архитектуре Древней Руси включающего Русский Север можно сопоставить с идеей гармонии, выраженной через симметрию и пропорции в рисунке Леонардо да Винчи.

Различия кроются в контексте и целях по данным методам при строительстве. Так в историческом контексте идеи Витрувия и практика «Витрувианского человека» относятся к античности и эпохе Возрождения, тогда как система пропорционирования в русском деревянном зодчестве формировалась на протяжении веков, будучи тесно связанной с практическими нуждами и народными традициями.

Главной целью использования пропорций в случае с «Витрувианским человеком» это стремление к универсальной гармонии и отражению законов мироздания через пропорции тела. В деревянном зодчестве данная традиция – достижение практической соразмерности, удобства и эстетической целостности сооружения.

Древнерусская деревянная архитектура является уникальным проявлением духовных и культурных ценностей восточнославянского народа. В условиях природной среды и отсутствия каменных материалов строительство из дерева стало основным способом воплощения религиозных, жилых, бытовых и социально-этнографических идей. Важной особенностью этого периода является использование таких мер длины, как локоть, сажень и вершок, которые были не только практическими стандартами, но и носителями символического значения, связанного с их природой.

Так в книге В.П. Орфинского «В мире сказочной реальности» при его исследовании в деревне Часовенская деревянных изб, окружающего ландшафта и непосредственно Варваринской часовни, построенной в 1750-х годах (рис. 4) выполнено важное наблюдение, подчёркивающее гармоничное взаимодействие архитектурных форм с природной средой. В.П. Орфинский отмечает, что деревянные дома и часовня органично вписываются в рельеф местности, сохраняя пропорциональную связь с окружающей природой и отражая традиционные представления о соотношении человека и пространства. Это свидетельствует о глубокой народной концепции гармонии и единства человека с природой, которая проявляется в архитектурных решениях и планировочных принципах, присущих деревянной архитектуре северного региона. Такой подход подчёркивает не только технические особенности строительства, но и культурно-символическое значение пространственных пропорций, что создаёт особую атмосферу сказочной реальности и духовного единства с окружающей средой.



Рисунок 4. Крыльцо Варваринской часовни

Варваринская часовня является примечательным объектом, характеризующимся рядом уникальных особенностей (рис. 5).



Рисунок 5. Варваринская часовня в д. Часовенская Рис. Г.Х. Логинской

«Интересно, что размеры крыльца, сеней и собственно часовни (в плане) увеличиваются с запада на восток (209, 294, 406 см) по геометрической прогрессии со знаменателем 1,4» [8, с. 59].

Как видно из выше сказанного и Леонардо да Винчи и древнерусские зодчие работали с пропорциями, но подходили к ним по-разному. Схема Леонардо да Винчи – это прежде всего работа с человеческим телом и идеальными формами. В «Витрувианском человеке» он зафиксировал пропорции, близкие к золотому сечению, примерно равные 1:1,618. Это показывает расстояние от макушки до подбородка относится к расстоянию от подбородка до пупка так же, как сумма всех высот к самой большей части. На рис. 1 показана геометрическая схема, где человек вписан одновременно в квадрат (пропорции тела) и в окружность. Данный рисунок показывает нам, что в нём нет привязки к конкретным строительным материалам или местным мерам, а открывает нам видимость «вечных» законов гармонии.

Зодчие в древнерусской традиции брали за основу систему сажень представленных на рис. 2 в виде разных мер длины маховая мерная сажень, великая косая сажень и др., и именно через соотношения этих сажень определялись пропорции близкие к золотому сечению. То есть русские мастера не искали абстрактное число φ , а строили гармоничную систему мер, из которой пропорция органично рождалась пропорция.

Разница подходов кроется в векторе мышления. Леонардо да Винчи видел в золотом сечении универсальный закон природы, который он пытался стремился в искусство и архитектуру через математические расчёты. В русской традиции этот же принцип был реализован сажень, пропорциональность сооружений достигалась не столько за счёт внешних вычислений, сколько за счёт внутренней кратности самих мер. Следовательно, если Леонардо да Винчи шёл от абстрактного идеала к его воплощению, то мастер в деревянном зодчестве действовал от практических решений, закладывая золотое сечение в саму логику строительных инструментов.

Таким образом, связь между традиционными мерами длины, архитектурными пропорциями и концепцией гармонии человека и пространства отражает синтез практической необходимости и духовных ценностей в древнерусской культуре, что делает их важным объектом историко-архитектурного анализа.

Результаты и обсуждения

В ходе проведённого историко-архитектурного анализа была выявлена существенная связь между элементами деревянной архитектуры древнерусских построек, используемыми единицами измерения длины и концепцией «Витрувианского человека» Леонардо да Винчи. Этот междисциплинарный подход позволил определить, как культурные представления о гармонии человека и окружающего мира отражались в строительных традициях, а также в системах мер и пропорций, используемых в деревянной архитектуре.

Связь деревянной архитектуры и мер длины определена в архитектурных памятниках древнерусского зодчества и показала, что размеры строительных конструкций и элементов (например, высота срубов, длина балок, ширина оконных и дверных проёмов) часто соотносились с древнерусскими мерами длины, такими как локоть, вершник, сажень. Эти мерки, имевшие как практическое, так и символическое значение, служили не только для удобства строительства, но и отражали представления о гармонии и пропорциональности, характерные для того времени.

При изучении концепция «Витрувианского человека» и пропорции, обнаружена взаимосвязь между пропорциями человеческого тела, заложенными в концепции «Витрувианского человека», и архитектурными пропорциями деревянных построек. В частности, некоторые системные соотношения размеров элементов зданий соответствовали пропорциям человеческого тела, что подчёркивало идею гармонии человека и природы, присущую древнерусской культуре. Эти пропорции служили не только эстетическим стандартом, но и средством обеспечения функциональности и структурной гармонии.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что древнерусская деревянная архитектура органично вписывалась в систему культурных ценностей, связанных с гармонией и пропорциональностью. Использование мер длины, соотносимых с человеческим телом, и их связь с концепцией «Витрувианского человека» показывают, что древнерусские зодчие осознанно или интуитивно придерживались принципов пропорциональности, схожих с ренессансными представлениями о гармонии человека и природы. Это подтверждает гипотезу о глубокой культурной взаимосвязи между архитектурой и представлениями о человеке как о гармоничном целом.

Дальнейшие исследования могут расширить наши представления о том, как эти пропорции и меры размерности влияли на архитектурный стиль, технологические приёмы и культурные представления о человеке в древнерусском обществе деревянного зодчества Русского Севера.

Заключение

В результате проведённого историко-архитектурного анализа установлено, что связь деревянной архитектуры древнерусских памятников с концепцией «Витрувианского человека» проявляется в гармоничном соотношении пропорций, масштабных соотношений и систем мер, определяющих архитектурное пространство с точки зрения симметрии и эстетической завершенности. Древнерусская деревянная архитектура, несмотря на свою

простоту и использование природных материалов, демонстрирует глубокое понимание принципов пропорциональности, схожих с идеями Леонардо да Винчи, реализованными через систему мер и нормативных соотношений.

Древнерусские измерительные системы, основанные на мерах и мерилах, тесно связаны с визуальной концепцией человека как центрального образца гармонии и баланса. Эти системы служили не только техническими инструментами для строительства, но и носителями культурных и философских идей о человеке как центре вселенной, что соответствует концепции «Витрувианского человека». Архитектурные памятники, созданные по этим меркам, воплощают идею универсальной гармонии между человеком, пространством и природой, что является важной характеристикой культурно-исторического наследия древнерусской деревянной архитектуры.

Таким образом, выявленная связь свидетельствует о том, что древнерусская деревянная архитектура является не только практическим воплощением инженерных знаний, но и носителем глубоких философских и эстетических идей. Эти идеи строились на принципах пропорциональности, гармонии и представления о человеке как о центре мироздания, что подтверждает важность междисциплинарного подхода к изучению памятников культуры. Дальнейшее исследование подобных связей может способствовать более глубокому пониманию культурных и технологических особенностей древнерусского зодчества, а также расширить представление о роли человека и его пропорций в архитектурном пространстве той эпохи.

Список литературы

1. Бодэ А.Б. Деревянные храмы Русского Севера. Архитектура и местное своеобразие / ред. Н.А. Котова. 125 с. – Москва: МГСУ, 2011.
2. Витрувий. Десять книг об архитектуре / пер. с лат. В.П. Зубова. – Изд. стереотип. (Из истории архитектурной мысли). – Москва: ЛЕНАНД, 2024. – 320 с.
3. Власов В.В. Древнерусская деревянная архитектура: история и особенности. – Москва: Наука, 2023. – 256 с.
4. Красовский М.В. Курс истории русской архитектуры. – Москва: Книга по Требованию, 2023. – 412 с.
5. Кузнецов А.И. Меры длины в древнерусском строительстве: исследование и реконструкция. – Санкт. – Петербург: Издательство СПбГУ, 2021. – 272 с.
6. Лебедев В.А. Архитектурные пропорции и их роль в формировании пространства в древнерусской архитектуре // Архитектура и дизайн. – 2024. – № 4. – С. 45–53.
7. Орфинский В.П. В мире сказочной реальности. – Петрозаводск: Карелия, 1972. – 133 с.
8. Орфинский В.П. Деревянное зодчество Карелии / Карельская организация Союза архитекторов СССР. – Ленинград: Стройиздат, Ленинградское отделение, 1972. – 119 с.
9. Петрова Е.М. Концепция «Витрувианского человека» и её влияние на архитектурно-пространственные идеи // Вестник Московского университета. Серия 22, Теория архитектуры. – 2023. – № 3. – С. 78–89.

10. Смирнов Ю.В. Связь эталонов мер и пропорций в традиционной русской деревянной архитектуре // Архитектурно-исторические исследования. – 2015. – № 2. – С. 112–125.
11. Тарасов А.П. Пропорции и масштаб в древнерусской деревянной архитектуре: историко-теоретический аспект // Известия Российского университета дружбы народов. Серия: История. – 2009. – № 1. – С. 34–42.
12. Фёдоров И.Н. Витрувианский человек и пропорции тела в концепции гармонии пространства // Наука и культура. – 2020. – № 6. – С. 59–66.

References

1. Bode A.B. Wooden Churches of the Russian North. Architecture and Local Uniqueness / A.B. Bode; [ed. by N.A. Kotova]. – Moscow: MGSU, 2011. – 125 P., [7] P. of color illustrations: ill. (In Russ.)
2. Vitruvius, Ten Books on Architecture: Translated from Latin / Revised and corrected by V.P. Zubov. Stereotyped edition (2nd edition, revised and corrected). – Moscow: LENAND, 2024. – 320 P. (From the history of architectural thought.) (In Russ.)
3. Vlasov V.V. Ancient Russian Wooden Architecture: History and Features. – Moscow: Nauka, 2023. – 256 P.: ill. (In Russ.)
4. Course in the History of Russian Architecture / Mikhail Vitoldovich Krasovsky – Moscow: Book on Demand, 2023. – 412 P.(In Russ.)
5. Kuznetsov A.I. Length measures in ancient Russian construction: research and reconstruction / A.I. Kuznetsov; Saint Petersburg State University. – Saint Petersburg: Saint Petersburg State University Press, 2021. – 272 P. (In Russ.)
6. Lebedev V.A. Architectural Proportions and Their Role in Shaping Space in Ancient Russian Architecture // Architecture and Design. – 2024. – P. 45–53. (In Russ.)
7. Orfinsky V.P. In the World of Fairy-Tale Reality [Text]. – Petrozavodsk: Karelia, 1972. – 133 P.: ill., maps. – 26×23 cm. (In Russ.)
8. Orfinsky Vyacheslav Petrovich. Wooden Architecture of Karelia [Text] / [Karelia. Organization of the Union of Architects of the USSR]. – [Leningrad]: [Stroyizdat. Leningrad Branch], [1972]. – 119 P.: ill.; 19x17 cm. (In Russ.)
9. Petrova E.M. The concept of the “Vitruvian Man” and its influence on architectural and spatial ideas // Bulletin of Moscow University. Series 22, Theory of Architecture. – 2023. – No. 3. – P. 78–89. (In Russ.)
10. Smirnov Yu.V. The Relationship between Measurement Standards and Proportions in Traditional Russian Wooden Architecture // Architectural and Historical Research. – 2015. – No. 2. – P. 112–125. (In Russ.)
11. Tarasov A.P. Proportions and Scale in Ancient Russian Wooden Architecture: A Historical and Theoretical Aspect // Proceedings of the Peoples’ Friendship University of Russia. Series: History. – 2009. – No. 1. – P. 34–42. (In Russ.)
12. Fedorov I.N. The Vitruvian Man and Body Proportions in the Concept of Space Harmony // Science and Culture. – 2020. – No. 6. – P. 59–66. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию: 09.09.2026

Статья принята к публикации: 15.09.2026

Статья опубликована: 28.09.2026

УДК 691.32+666.97

DOI: 10.32743/UniTech.2026.150.9.23017

Анализ растекаемости, средняя плотность и прочностные свойства пенобетона

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

Отажонов Олмосбек Аскарали угли

ст. преп

Ферганский государственный технический университет

Республика Узбекистан, г. Фергана

E-mail: olmosbekotajonov@gmail.com

Умирдинов Ихтиёржон Олимжон угли

исследователь, Ферганский государственный технический университет

Республика Узбекистан, г. Фергана

E-mail: umirdinov93i@gmail.com

Мадраймов Нийетбай Амангелдиевич

докторант кафедры

Строительство и инженерия окружающей среды, Ташкентский архитектурно-
строительный университет

Республика Узбекистан, г. Ташкент

E-mail: madraymovniko@gmail.com

Библиографическое описание: Анализ растекаемости, средняя плотность и прочностные свойства пенобетона // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Сатторов З.М. [и др.]. 2026. 9(150). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23017>

Analysis of flowability, average density and strength properties of foam concrete

Sattorov Zafar Muradovich

*professor of the department Construction and environmental engineering Tashkent University of
Architecture and Civil Engineering
Republic of Uzbekistan, Tashkent*

Otajonov Olmosbek Askarali ugli

*senior Lecturer
Fergana State Technical University
Republic of Uzbekistan, Fergana*

Ikhtiyorjon Olimjon Ugli Umirdinov

*Researcher
Fergana State Technical University
Republic of Uzbekistan, Fergana*

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 статье представлен обзор современных научных исследований, посвящённых свойствам, технологии производства и областям применения пенобетона как одного из наиболее перспективных видов ячеистых бетонов. Актуальность работы обусловлена необходимостью разработки энергоэффективных и экологически безопасных строительных материалов, обеспечивающих снижение массы конструкций при сохранении требуемых эксплуатационных характеристик. На основе анализа отечественных и зарубежных публикаций рассмотрены особенности формирования пористой структуры пенобетона, его классификация по плотности и условиям твердения, а также основные физико-механические свойства материала. Особое внимание уделено реологическим характеристикам пенобетонных смесей, включая консистенцию, растекаемость и устойчивость. Установлено, что важную роль в обеспечении стабильности структуры играют состав смеси, водоцементное отношение, тип пенообразователя и применение минеральных и химических добавок. Показано, что пенобетон обладает низкой плотностью, высокими тепло- и звукоизоляционными свойствами, огнестойкостью и достаточной прочностью, что позволяет эффективно использовать его в строительстве жилых, общественных и промышленных объектов. Рассмотрено влияние золы-уноса, микрокремнезёма, суперпластификаторов и армирующих волокон на эксплуатационные характеристики материала. Установлено, что применение модифицирующих добавок способствует повышению прочности, снижению усадки, улучшению структуры порового пространства и уменьшению водопоглощения. Результаты анализа подтверждают, что пенобетон является перспективным строительным материалом, обеспечивающим рациональное использование местного сырья и промышленных отходов. Дальнейшее совершенствование состава и технологии производства пенобетона позволит повысить его долговечность, энергоэффективность и конкурентоспособность в современном строительстве.

Abstract

This article presents a comprehensive review of modern scientific studies devoted to the properties, production technology, and application areas of foam concrete as one of the most promising types of cellular concrete. The relevance of the research is associated with the growing demand for energy-efficient and environmentally sustainable construction materials capable of reducing the weight of structures while maintaining the required mechanical and operational performance. Based on an analysis of international and domestic publications, the paper examines the formation of the porous structure of foam concrete, its classification according to density and curing conditions, and its main physical and mechanical characteristics. Particular attention is paid to the rheological properties of foam concrete mixtures, including consistency, flowability, and stability. The review demonstrates that the composition of the mixture, water-to-cement ratio, type of foaming agent, and the use of mineral and chemical admixtures significantly influence the stability and quality of the material.

The study shows that foam concrete possesses several important advantages, including low density, excellent thermal and acoustic insulation properties, fire resistance, and sufficient compressive strength. These characteristics make it suitable for use in residential, public, and industrial construction. The effects of fly ash, silica fume, superplasticizers, and reinforcing fibers on the performance of foam concrete are also discussed. It was found that the incorporation of modifying additives improves strength, reduces drying shrinkage, enhances pore structure, and decreases water absorption. The results of the analysis confirm that foam concrete is a highly promising construction material that enables the efficient utilization of local raw materials and industrial by-products. Further improvements in its composition and production technology will contribute to the development of durable, energy-efficient, and environmentally friendly building materials for modern construction.

Ключевые слова: глобальный климат, пенобетон, пеностеклобетон, цемент, дисперсия, высокопористый материал, пористость, водопоглощение, целлюлоза, сурфактант, поверхностная активность.

Keywords: global climate, foamed concrete, foam glass concrete, cement, dispersion, highly porous material, porosity, water absorption, cellulose, surfactant, surface activity.

Введение

Современные исследования в области строительных материалов направлены на разработку более эффективных и энергоэкономичных решений, среди которых особое место занимает пенобетон.

В зависимости от способа формирования пористой структуры ячеистые бетоны подразделяются на две основные группы: газобетон и пенобетон [9]. Пенобетон представляет собой разновидность ячеистого бетона, структура которого формируется за счёт введения в цементную композицию специальных пенообразующих веществ. В результате образуются устойчивые воздушные поры, обеспечивающие снижение плотности материала до значений от 300 до 1800 кг/м³ [1]. К основным преимуществам пенобетона относятся низкий расход

заполнителей, высокая текучесть смеси, значительная пористость, хорошие теплоизоляционные свойства, огнестойкость, малый удельный вес, способность эффективно поглощать воздушный шум и достаточная прочность при сжатии.

По условиям твердения ячеистые бетоны подразделяются на автоклавные и неавтоклавные. Автоклавная технология предусматривает обработку материала при повышенном давлении и температуре, что обеспечивает формирование специфических эксплуатационных характеристик. Кроме того, пенобетон классифицируется по средней плотности [2]. Материалы плотностью 300–600 кг/м³ используются преимущественно в качестве теплоизоляции и для заполнения пустот. Пенобетоны плотностью 600–1200 кг/м³ применяются для изготовления несущих строительных элементов: стеновых блоков, наружных панелей, перегородок и различных тепло- и звукоизоляционных изделий. Более плотные разновидности пенобетона (1200–1600 кг/м³) могут использоваться при изготовлении отдельных несущих конструкций [2, 15].

Согласно исследованиям, проведённым Джалалом и соавторами [13], пенобетон обладает достаточной прочностью для заполнения полостей и пустот различной глубины и протяжённости в условиях индустриального строительства без необходимости вибрационного уплотнения. Материал обеспечивает высокую скорость выполнения работ, практически не подвержен осадке после укладки, обладает эффективными теплоизоляционными свойствами [17], высокой морозостойкостью и хорошей огнестойкостью. В настоящее время пенобетон широко применяется при устройстве тепло- и звукоизоляции полов, теплоизоляции плоских и скатных кровель, заполнении подземных полостей, производстве строительных блоков и стеновых панелей, возведении малоэтажных монолитных зданий, строительстве дорожных оснований, усилении опор мостов и стабилизации грунтов [3, 4, 12, 18]. Несмотря на многочисленные преимущества, распространённость пенобетона в мировой строительной практике остаётся сравнительно невысокой. По имеющимся данным, его доля применения составляет около 5,6 % в Северной Америке, 5,6 % в Австралии, 33,3 % в странах Европы и 5,6 % в Африке. Подобная ситуация свидетельствует о том, что потенциал данного материала ещё не реализован в полной мере. Основными причинами являются недостаточная информированность специалистов о его возможностях, ограниченное доверие к материалу и отсутствие необходимых технологических решений для его широкомасштабного внедрения [18].

Материалы и методы

Свойства пенобетона. Реологические характеристики пенобетонной смеси оцениваются по показателям консистенции и устойчивости. Для их определения применяются стандартные методы испытаний с использованием конуса Марша, расплавленного конуса и различных типов вискозиметров. Согласно результатам исследований, пенобетонные смеси с временем истечения менее 20 секунд и показателем расплава в пределах 40–60 % относятся к смесям нормальной консистенции [14].

Введение пены в цементную систему приводит к заметному снижению текучести смеси. Это объясняется увеличением внутренних связей между компонентами и уменьшением удельного веса материала. Использование суперпластификаторов, напротив, способствует повышению подвижности и улучшению технологичности смеси [10].

Установлено, что увеличение водоцементного отношения положительно влияет на консистенцию пенобетона. Однако чрезмерное содержание воды вызывает расслоение смеси и ухудшает её однородность. Исследования свежеприготовленного пенобетона, в котором часть цемента заменялась молотым гранулированным доменным шлаком, а мелкий заполнитель — золой-уносом, показали, что сверхтонкий доменный шлак практически не влияет на удобоукладываемость смеси. В то же время введение золы-уноса приводит к её загущению вследствие увеличения количества мелкодисперсных частиц и возрастания потребности в воде [8]. Одним из факторов, определяющих консистенцию смеси, является плотность заполнителя. Использование заполнителей с пониженной плотностью уменьшает подвижность смеси, однако данный эффект может быть частично компенсирован введением золы-уноса [9].

Устойчивость пенобетонной смеси. Устойчивой считается такая пенобетонная смесь, фактическая плотность которой соответствует проектной плотности, а также отсутствуют признаки водоотделения и сегрегации компонентов. Оценка устойчивости осуществляется с использованием поликарбонатных цилиндров глубиной 500 мм и внутренним диаметром 75 мм, стенки которых покрываются полиэтиленовой плёнкой. В течение 24 часов фиксируется изменение высоты образца. Исследования показали, что при плотности пенобетона выше 400 кг/м^3 применение 100 % портландцемента обеспечивает получение устойчивой смеси. Для составов плотностью менее 400 кг/м^3 повышение устойчивости достигается заменой 5–10 % массы цемента кальций-сульфоалюминатным компонентом [5]. Существенное влияние на устойчивость оказывает консистенция базового раствора, в который вводится пена. При показателе распада около 45 % смесь считается оптимально сбалансированной и устойчивой. Добавление золы-уноса требует увеличения отношения «вода – твёрдая фаза» для сохранения стабильности структуры. Введение суперпластификаторов позволяет снизить водоцементное отношение ниже 0,3 и повысить устойчивость смеси примерно на 43 % [5].

Даже небольшие концентрации пенообразователей оказывают положительное влияние на стабильность пенобетонной системы. Адгезионные силы между твёрдыми частицами и воздушными пузырьками повышают жёсткость структуры. Однако в процессе перемешивания возможно разрушение части воздушных пор, что отрицательно сказывается на устойчивости смеси. Данный эффект уменьшается при увеличении отношения воды к твёрдым компонентам [16].

Для оценки устойчивости пенобетона исследователями предложены различные методы, среди которых наиболее распространены:

1. сравнение фактической плотности свежеприготовленного пенобетона с расчётной плотностью;
2. анализ различий между расчётным и фактическим водоцементным отношением с допустимым отклонением около 2 %.

Исследования Jones и соавторов [5] показали, что пенобетоны плотностью менее 500 кг/м^3 более склонны к потере устойчивости. Подъёмная сила воздушных пузырьков прямо пропорциональна их размеру и возрастает при снижении плотности смеси. Если эта сила превышает сопротивление цементной матрицы, пузырьки начинают вытеснять твёрдые частицы и перемещаться к поверхности, что приводит к нарушению структуры материала.

Увеличение размеров пузырьков и уменьшение объёма твёрдой фазы вызывают истончение перегородок между порами. В результате внутреннее давление из более мелких пузырьков передаётся крупным, что способствует их дальнейшему росту и изменению поровой структуры материала. Было установлено, что устойчивые низкоплотные пенобетоны можно получить путём частичной замены портландцемента кальций-сульфоалюминатными компонентами.

Согласно исследованиям Cong и Bing [11], введение микрокремнезёма способствует формированию более равномерной и закрытой поровой структуры, что положительно отражается на теплоизоляционных свойствах и прочности материала. Добавление гашёной извести приводит к увеличению плотности и прочности пенобетона, однако несколько снижает устойчивость пены.

Qiao и соавторы [5] исследовали возможность применения поверхностно-активных веществ типа Gemini в качестве эффективных пенообразователей для бетона. По сравнению с традиционными ПАВ они обеспечивают более высокую устойчивость пены, улучшенное вовлечение воздуха и повышенную поверхностную активность. Наилучшие результаты были получены при использовании Gemini-сурфактантов, модифицированных сульфатными, фосфатными и сульфонатными группами.

Влияние различных поверхностно-активных веществ на свойства пенобетонных смесей также было изучено Samson [6]. В исследовании были рассмотрены такие пенообразователи, как цетилтриметиламмоний бромид, AER Sika, цетримид, Microair, Neopor и Hostapur OSB (натриевая соль альфа-олефинсульфата). Результаты показали, что наиболее эффективным оказался Hostapur OSB, за которым следуют цетилтриметиламмоний бромид и цетримид. Именно эти добавки обеспечили оптимальное сочетание прочности при сжатии, плотности и коэффициента теплопроводности пенобетона.

Siva и соавторы [7] разработали экологически безопасный пенообразователь для цементных композитов на основе плодов мыльного ореха (*Sapindus mukorossi*). Перикарпий этого растения был предложен в качестве альтернативы синтетическим пенообразующим веществам. Проведённые испытания показали, что полученная пена соответствует действующим требованиям по своим характеристикам. Более того, раствор, приготовленный из предварительно замоченного и нагретого до 80 °C сырья, продемонстрировал лучшие показатели по сравнению с пеной, полученной без термической обработки.

Таблица 1.

Показатели устойчивости, расплава и прочности исследованных пенобетонных смесей [4]

Названия смесей	Стабильность	Растекаемость, мм	Средняя плотность,	Прочность на сжатие образца через 14 дней, МПа
ILT-P2,36 -0,46	1	180	1295	2,98
ILT-P2,36 -0,48	1,03	217	1345	3,83
ILT-P2,36 -0,50	1,04	249	1350	4,06
ILT-P2,36 -0,52	0,97	272	1259	3,31
ILT-P2,36 -0,54	0,99	326	1297	3,05
ILT-P1,18-0,48	1,02	174	1330	3,67

Названия смесей	Стабильность	Растекаемость, мм	Средняя плотность,	Прочность на сжатие образца через 14 дней, МПа
ILT-PI,18 -0,50	1,03	199	1342	3,94
ILT-P1,18-0,52	1,04	224	1349	3,98
ILT-P1,18-0,54	0,97	238	1259	3,31
ILT-P1,18-0,56	0,99	267	1287	2,97
ILT-P0,90 -0,50	0,99	208	1295	3,77
ILT-P0,90 -0,52	1,02	214	1330	3,89
ILT-P0,90 -0,54	1,01	225	1305	4,39
ILT-P0,90 -0,56	1,03	232	1345	3,65
ILT-P0,90 -0,58	0,99	270	1290	3,19
ILT-P0,60 -0,52	1,03	194	1339	4,27
ILT-P0,60 -0,54	1,04	203	1352	4,42
ILT-P0,60 -0,56	1,02	210	1318	4,52
ILT-P0,60 -0,58	1,03	224	1348	4,51
ILT-P0,60 -0,60	1,03	245	1308	4,38

Примечание: ILT-P — название экспериментального образца; 2,36 — размер частиц наполнителя; 0,46 — доля наполнителя в смеси.

Установлено, что применение нанокремнезёма совместно с амфотерными поверхностно-активными веществами бетаинового типа и органическим стабилизатором на основе гидроксипропилметилцеллюлозы способствует увеличению срока существования пены и формированию более мелких и равномерных пор. Добавление гидроксипропилметилцеллюлозы практически не изменяет размеры пор, однако приводит к увеличению толщины плёнки, окружающей пузырьки воздуха. Введение нанокремнезёма, напротив, постепенно уменьшает размеры пузырьков.

Механизм стабилизации пены объясняется взаимодействием между компонентами системы. Между гидрофобными группами поверхностно-активного вещества и гидроксипропилметилцеллюлозы действуют силы Ван-дер-Ваальса, тогда как между гидрофильными группами ПАВ и частицами нанокремнезёма возникают кулоновские силы притяжения. Совместное действие этих факторов обеспечивает устойчивость воздушно-пористой структуры [6]. Вместе с тем введение стабилизированной пены приводит к снижению способности пор к дальнейшему диспергированию [7].

Растекаемость пенобетонной смеси. Подвижность и растекаемость пенобетона обычно оцениваются визуально или с использованием вискозиметра Суттарда. Традиционные методы определения удобоукладываемости не всегда подходят для смесей с низкой плотностью. В связи с этим Brewer [16] предложил использовать метод расплава для лёгких бетонов. Согласно данной методике, образец помещается в цилиндр длиной 150 мм и диаметром 75 мм, открытый с обеих сторон. После поднятия цилиндра измеряют диаметры расплава смеси в двух взаимно перпендикулярных направлениях и вычисляют их среднее значение. Оптимальный показатель расплава должен составлять около 5 мм. Для пенобетонов на основе цементно-песчаного раствора рекомендуемая величина расплава находится в пределах 85–125 мм, тогда как для смесей с добавлением золы-уноса этот показатель может

достигать 115–140 мм. Увеличение объёма пены сопровождается повышением вязкости смеси, вследствие чего для сохранения требуемой подвижности необходимо дополнительное количество воды. Отмечается также, что использование дроблёного карьерного песка обеспечивает лучшую удобоукладываемость при меньшем расходе воды по сравнению со смесями, содержащими золошлаковые материалы [10].

Физические свойства пенобетона. К основным физическим характеристикам, определяющим эксплуатационные свойства пенобетона, относятся усадка при высыхании, структура воздушных пор, водопоглощение и водопроницаемость.

Усадка при высыхании. Из-за отсутствия крупного заполнителя пенобетон характеризуется значительно большей усадкой по сравнению с тяжёлым бетоном. По данным исследований, величина усадки может быть примерно в десять раз выше, чем у традиционных бетонных материалов [9]. Эффективным способом снижения усадочных деформаций является введение армирующих волокон. Волокна удерживают часть влаги внутри структуры материала и замедляют её испарение, что способствует уменьшению усадки. При этом степень снижения усадочных деформаций напрямую зависит от содержания волокон в смеси: чем выше их количество, тем меньше величина усадки [7].

Сравнительные исследования пенобетонов, армированных полипропиленовыми, стеклянными, стальными, конопляными и пальмовыми волокнами, показали, что наилучшие результаты обеспечивают стеклянные и полипропиленовые волокна благодаря их высокой способности удерживать влагу. Использование стальных волокон оказалось менее эффективным вследствие их гидрофильной природы и значительной собственной массы [11].

Водопоглощение и проницаемость. Способность пенобетона поглощать воду тесно связана с объёмом и структурой порового пространства. Увеличение количества пор приводит к ускорению проникновения воды внутрь материала. Особенно интенсивное водопоглощение наблюдается при наличии сообщающихся поровых каналов. На данный показатель влияет не только объём пор, но и количество цементного теста в структуре материала. С увеличением содержания вяжущей пасты водопоглощение также возрастает [6]. Исследования показали, что основной объём воды поглощается пенобетоном в течение первых шести часов после контакта с влагой. При этом значения водопоглощения, определённые через 6 и 48 часов, практически не отличаются друг от друга. Для снижения водопоглощения применяются гидрофобизирующие добавки, такие как стеарат кальция, триметилсиланолат калия и полимеры на основе силоксанов. Увеличение содержания таких добавок уменьшает силы сцепления между поверхностью пор и молекулами воды, что способствует снижению влажностного насыщения материала и повышению коэффициента сохранения прочности [3]. Nambiar и соавторы [12] установили, что капиллярное водопоглощение определяется не только количеством пор, но и степенью их взаимосвязи. При преобладании открытых сообщающихся пор наблюдается интенсивное проникновение воды, тогда как наличие большого количества замкнутых пор существенно ограничивает этот процесс. Кроме того, было отмечено, что увеличение доли золы-уноса при замене песка способствует росту водопоглощения при одинаковом объёме пены.

Результаты и обсуждение

Вид и количество золы оказывают значительно меньшее влияние на данный показатель. Установлено, что объём воды, поглощаемой пенобетоном, примерно в два раза превышает аналогичный показатель для традиционного бетона. При этом смеси, содержащие золу-унос, обладают меньшей водопроницаемостью по сравнению с составами, изготовленными с использованием пылевидной топливной золы [18]. Применение заполнителей с низкой пористостью может приводить к образованию межфазных пустот и микротрещин, что способствует увеличению проницаемости материала. Использование предварительно высушенных заполнителей позволяет частично поглощать воду затворения, снижая фактическое водоцементное отношение и улучшая долговечность бетона. Для низкоплотных пенобетонов хорошая морозостойкость была достигнута при условии, что начальное водопоглощение не превышало 16 % [7].

Заключение

Одной из актуальных задач современного строительства является снижение массы строительных конструкций при одновременном повышении их энергоэффективности. В ходе данного исследования был выполнен анализ научных публикаций, посвящённых составу, технологии получения, физико-механическим свойствам и особенностям применения пенобетона. Проведённый обзор показал, что пенобетон относится к числу наиболее перспективных материалов для современного строительства. Результаты анализа показали, что пенобетон обладает рядом важных преимуществ, таких как низкая плотность, высокие теплоизоляционные свойства, огнестойкость и технологичность производства. Благодаря этим качествам материал может эффективно использоваться при возведении жилых, общественных и промышленных зданий. Вместе с тем для пенобетона характерны повышенная усадка и сравнительно высокое водопоглощение, что требует применения армирующих волокон, гидрофобизирующих и модифицирующих добавок. Пенобетон является перспективным строительным материалом, обеспечивающим рациональное использование местного сырья и промышленных отходов. Дальнейшие исследования, направленные на совершенствование его структуры и свойств, будут способствовать созданию долговечных, энергоэффективных и экологически безопасных строительных материалов нового поколения.

Список литературы

1. Akhund M.A., Khoso A.R., Pathan A.A., Memon U., Siddiqui F.H. Influence of biomass aggregate on strength of foam concrete // International Journal of Civil Engineering and Technology. – 2017. – Т. 8.
2. Ali Hamad J. Materials, production, properties and application of aerated lightweight concrete // International Journal of Materials Science and Engineering. – 2014. – Т. 2, № 2. – P. 152–157.
3. Balamurugan G., Chockalingam K., Chidambaram M., Aravindh Kumar M., Balasundaram M. Experimental study on light weight foam concrete bricks // International Research Journal of Engineering and Technology. – 2017. – P. 677–686.

4. Gambhir M.L., Jamwal N. Building Materials, Products, Properties & Systems. – New Delhi: Tata McGraw Hill Education Private Limited, 2011.
5. Hadipramana J., Samad A.A. A., Zaidi A.M. A., Mohammad N., Riza F.V. Effect of uncontrolled burning rice husk ash in foamed concrete // Advanced Materials Research. – 2017. – Т. 626. – P. 769–775. – DOI: 10.4028/.
6. Hajimohammadi A., Ngo T., Mendis P., Nguyen T., Kashani A. van Deventer J.S. J. Pore characteristics in one-part mix geopolymers foamed by H_2O_2 : the impact of mix design // Materials & Design. – 2017. – Т. 130. – P. 381–391.
7. Ikponmwosa E., Fapohunda C., Kolajo O., Eyo O. Structural behaviour of bamboo-reinforced foamed concrete slab containing polyvinyl wastes (PW) as partial replacement of fine aggregate // Journal of King Saud University – Engineering Sciences. – 2017. – Т. 29. – P. 348–355. – DOI: 10.1016/j.jksues.2015.06.005.
8. Kearsley E.P., Wainwright P.J. The effect of high fly ash content on the compressive strength of foamed concrete // Cement and Concrete Research. – 2001. – Т. 31, № 1. – P. 105–112.
9. Lim S.K., Tan C.S., Zhao X., Ling T.C. Strength and toughness of lightweight foamed concrete with different sand grading // KSCE Journal of Civil Engineering. – 2014. – Т. 19. – P. 2191–2197. – DOI: 10.1007/s12205-014-0097-y.
10. Lim S.K., Tan C.S., Li B., Ling T.C., Hossain M.U., Poon C.S. Utilizing high volumes quarry wastes in the production of lightweight foamed concrete // Construction and Building Materials. – 2017. – Т. 151. – P. 441–448.
11. Ramamurthy K., Nambiar E.K. K., Ranjani G.I. S. A classification of studies on properties of foam concrete // Cement and Concrete Composites. – 2009. – Т. 31. – P. 388–396. – DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2009.04.006.
12. Richard T., Dobogai J., Gerhardt T., Young W. Cellular concrete – a potential load-bearing insulation for cryogenic applications // IEEE Transactions on Magnetics. – 1975. – Т. 11, № 2. – P. 500–503.
13. Saman M., Sharipudin S.S., Ridzuan A.R. M. Performance of foamed concrete with waste paper sludge ash (WPSA) and fine recycled concrete aggregate (FRCA) contents // International Sustainable Civil Engineering Journal. – 2012. – Т. 1. – P. 19–27.
14. Valore R.C. Cellular concrete part 1 composition and methods of production // ACI Journal. – 1954. – Т. 50. – P. 773–796.
15. Yuvaraj S., Karthik S., Naveen N., Ridhu Pharan S.S., Sargunam P., Sethunarayanan S., Vyshnav C. Experimental research on foam concrete with partial replacement of sand by m-sand // IJATES. – 2015. – Т. 3.
16. Zhao X., Lim S.K., Tan C.S., Li B., Ling T.C., Huang R., Wang Q. Properties of foamed mortar prepared with granulated blast-furnace slag // Materials. – 2015. – Т. 8, № 2. – P. 462–473. – DOI: 10.3390/ma8020462.

References

1. Adipramana J., Samad A.A.A., Zaidi A.M.A., Mohammad N., Riza F.W.J. [Hadipramana, A.A.A. Samad, A.M.A. Zaidi, N. Mohammad, F.V. Riza, Effect of uncontrolled burning rice husk ash in foamed concrete, *Adv. Mater. Res.* 626 (2012) 769–775] // *Adv. Mater. Res.* – 2012. – Vol. 626. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.626.769. (In Russ.)
2. Амран Ю.Х.М., Фарзадния Н., Али А.А.А.У.Н.М. [Amran, N. Farzadnia, A.A.A. Ali, Properties and applications of foamed concrete; a review, *Constr. Build. Mater.* 101 (2015) 990–1005] / // *Constr. Build. Mater.* – 2015. – Vol. 101. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.112 – URL: <https://doi> (дата обращения: 19.09.2026). (In Russ.)
3. Dzhalal M., Tanvir A., Dzhagdish K., Akhmed F.M. [Jalal, A. Tanveer, K. Jagdeesh, F. Ahmed, Foam concrete, *Int. J. Civ. Eng. Res.* 8 (2017) 2278–3652] // *Int. J. Civ. Eng. Res.* – 2017. – Vol. 8 – URL: <http://www.ripublication.com> (дата обращения: 19.09.2026). (In Russ.)
4. Лим С.К., Тан К.С., Чжао К., Линг Т.К.С.К. [Lim, C.S. Tan, X. Zhao, T.C. Ling, Strength and toughness of lightweight foamed concrete with different sand grading, *KSCE J. Civ. Eng.* 19 (2014) 2191–2197] // *KSCE Journal of Civil Engineering.* – 2014. – Vol. 19. – DOI: 10.1007/s12205-014-0097-у. (In Russ.)
5. Саман М., Шарипудин С.С., Ридзуан А.Р.М.М. [Saman, S.S. Sharipudin, A.R.M. Ridzuan, Performance of foamed concrete with waste paper sludge ash (WPSA) and fine recycled concrete aggregate (FRCA) contents, *Int. Sustain. Civ. Eng. J.* 1 (2012) 19–27] // *Int. Sustain. Civ. Eng. J.* – 2012. – Vol. 1. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.626.376 – URL: <https://doi.org/> (дата обращения: 19.09.2026). (In Russ.)
6. A. Hajimohammadi, T. Ngo, P. Mendis, T. Nguyen, A. Kashani, Deventer., Pore characteristics in one-part mix geopolymers foamed by H₂O₂: the impact of mix design, *Mater. Des.* 130 (2017) 381–391.
7. E.P. Kearsley, P.J. Wainwright, The effect of high fly ash content on the compressive strength of foamed concrete, *Cem. Concr. Res.* 31 (1) (2001) 105–112. 796 A. Raj et al. / *Construction and Building Materials* 221 (2019) 787–799.
8. G. Balamurugan, K. Chockalingam, M. Chidambaram, M. Aravindha Kumar, M. Balasundaram, Experimental study on light weight foam concrete bricks, *Int. Res. J. Eng. Technol.* (2017) 677–686. www.irjet.net.
9. Gambhir M.L., Jamval N.M.L. Gambhir, NehaJamval, *Building Materials, Products, Properties & Systems*, Tata Mcgraw hill education private limited. – New Delhi: Tata McGraw Hill Education Private Limited, 2011.
10. Ikponmwosa E., Fapohunda C., Kolajo O., Eyo O.E. Ikponmwosa, C. Fapohunda, O. Kolajo, O. Eyo, Structural behaviour of bamboo-reinforced foamed concrete slab containing polyvinyl wastes (PW) as partial replacement of fine aggregate, *J. King Saud Univ. – Eng. Sci.* 29 (2017) 348–355 // *J. King Saud Univ.* – 2017. – Vol. 29. – DOI: 10.1016/j.jksues.2015.06.005.
11. J. Ali, Hamad, Materials, production, properties and application of aerated lightweight concrete, *Int. J. Mater. Sci. Eng.* 2 (2) (2014) 152–157.

12. Lim S.K., Tan C.S., Li B., Ling T.C., Hossain M.U., Poon C.S.S.K. Lim, C.S. Tan, B. Li, T.C. Ling, M.U. Hossain, C.S. Poon, Utilizing high volumes quarry wastes in the production of lightweight foamed concrete, *Constr. Build. Mater.* 151 (2017) 441–448, [j.conbuildmat.2017.06.091](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.091) // *Constr. Build. Mater.* – 2017. – Vol. 151. – DOI: 10.1016/.
13. M.A. Akhund, A.R. Khoso, A.A. Pathan, U. Memon, F.H. Siddiqui, Influence of biomass aggregate on strength of foam concrete, *Int. J. Civ. Eng. Technol.* 8 (2017).
14. R.C. Valore, Cellular concrete part 1 composition and methods of production, *ACI J.* 50 (1954) 773–796.
15. Ramamurthy K., Nambiar E.K.K., Ranjani G.I.S.K. Ramamurthy, E.K.K. Nambiar, G.I.S. Ranjani, Cement and concrete composites A classification of studies on properties of foam concrete, *Cem. Concr. Compos.* 31 (2009) 388–396, [cemconcomp.2009.04.006](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.04.006) // *Cement and Concrete Composites.* – 2009. – Vol. 31. – DOI: 10.1016/j.
16. S. Yuvaraj, S. Karthik, N. Naveen, S.S. RidhuPharan, P. Sargunam, S. Sethunarayanan, C. Vyshnav, Experimental research on foam concrete with partial replacement of sand by msand, *IJATES* 3 (2015).
17. T. Richard, J. Dobogai, T. Gerhardt, W. Young, Cellular concrete-a potential load-bearing insulation for cryogenic applications, *IEEE Trans. Magn.* 11 (2) (1975) 500–503.
18. Zhao X., Lim S.K., Tan C.S., Li B., Ling T.C., Huang R., Wang Q.X. Zhao, S.K. Lim, C.S. Tan, B. Li, T.C. Ling, R. Huang, Q. Wang, Properties of foamed mortar prepared with granulated blast-furnace slag, *Materials (Basel)* 8 (2015) 462–473 // *Materials (Basel).* – 2015. – Vol. 8, No. 2. – DOI: 10.3390/ma8020462.

Статья поступила в редакцию: 02.09.2026

Статья принята к публикации: 08.09.2026

Статья опубликована: 28.09.2026

УДК 691.3+661.86

DOI: 10.32743/UniTech.2026.150.9.23388

Оптимизация состава и повышение водостойкости магнезиального оксихлоридного цемента на основе доломита Джамансайского и метакаолина Хужакульского месторождений

Туремуратов Шарибай Науризбаевич

д-р хим. наук, проф.

(DSc) Каракалпакский научно-исследовательский институт естественных наук
Каракалпакстанского отделения Академии наук Республики Узбекистан

Республика Узбекистан, г. Нукус

E-mail: tsharibay@mail.ru

Сайнов Абат Азатович

докторант (PhD)

Каракалпакский научно-исследовательский институт естественных наук
Каракалпакстанского отделения Академии наук Республики Узбекистан

Республика Узбекистан, г. Нукус

E-mail: saynov.abat@aknuk.uz

Абылова Амина Жанабаевна

д-р хим. наук (DSc), Каракалпакский научно-исследовательский институт естественных наук
Каракалпакстанского отделения Академии наук Республики Узбекистан

Республика Узбекистан, г. Нукус

E-mail: abilova.amina@aknuk.uz

Бекбосынова Рысгул Жиемуратовна

мл. науч. сотр Каракалпакский научно-исследовательский институт естественных наук
Каракалпакстанского отделения Академии наук Республики Узбекистан

Республика Узбекистан, г. Нукус

E-mail: bekbosinova.rusgul@aknuk.uz

Абылов Женис Жанабаевич

мл. науч. сотр Каракалпакский научно-исследовательский институт естественных наук
Каракалпакстанского отделения Академии наук Республики Узбекистан

Республика Узбекистан, г. Нукус

E-mail: abilov.jenis@aknuk.uz

Мнажов Аманияз Ниетбаевич

докторант (PhD)

Каракалпакский научно-исследовательский институт естественных наук
Каракалпакстанского отделения Академии наук Республики Узбекистан

Республика Узбекистан, г. Нукус

E-mail: mnajov.amaniyaz@aknuk.uz

Библиографическое описание: Оптимизация состава и повышение водостойкости магнезиального оксихлоридного цемента на основе доломита Джамансайского и метакаолина Хужакульского месторождений // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Туремуратов Ш.Н. [и др.]. 2026. 9(150). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23388>

Compositional optimization and enhanced water resistance of magnesium oxychloride cement based on Jamansay-deposit dolomite and Khojakul-deposit metakaolin

Turemuratov Sharibay Naurizbaevich

Doctor of Chemical Sciences, Professor (DSc)

*Karakalpak Research Institute of Natural Sciences, Karakalpakstan Branch of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan
Republic of Uzbekistan, Nukus*

Saipov Abat Azatovich

PhD

Doctoral Candidate

*Karakalpak Research Institute of Natural Sciences of the Karakalpakstan Branch of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan
Republic of Uzbekistan, Nukus*

Abylova Amina Zhanabaevna

Doctor of Chemical Sciences (DSc)

*Karakalpak Research Institute of Natural Sciences of the Karakalpakstan Branch of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan
Republic of Uzbekistan, Nukus*

Bekbosynova Rysgul Zhiemuratovna

Junior Researcher

*Karakalpak Research Institute of Natural Sciences of the Karakalpakstan Branch of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan
Republic of Uzbekistan, Nukus*

Abylov Zhenis Zhanabaevich

Junior Researcher

*Karakalpak Research Institute of Natural Sciences of the Karakalpakstan Branch of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan
Republic of Uzbekistan, Nukus*

Mnazhov Amaniyaz Nietbaevich

PhD

Doctoral Candidate

*Karakalpak Research Institute of Natural Sciences of the Karakalpakstan Branch of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan
Republic of Uzbekistan, Nukus*

Аннотация

В работе представлена физико-химическая характеристика композиционного магниезиального оксихлоридного цемента (МОЦ) на основе доломита Джамансайского месторождения и каолина Хужакульского месторождения, а также результаты оптимизации его состава путём модификации метакаолином (0–20 %) при варьировании соотношения твёрдое/жидкое (Ж/Т) для раствора $MgCl_2$ постоянной концентрации 26 % (40–55 %). Доломит активировали селективной кальцинацией при 740–750°C, каолин обжигали при 750°C для получения метакаолина; режимы обоснованы данными ТГ-ДТА-ДТГ и ФТИР-спектроскопии. Динамические испытания в водной среде (120 ч) показали, что немодифицированный МОЦ подвергается структурному выщелачиванию после 48 ч, тогда как состав с 15 % метакаолина демонстрирует полную гидравлическую стабильность (коэффициент размягчения $R_f = 0,87$; 67,3 МПа в сухом состоянии и 58,5 МПа после погружения в воду). Многокритериальная оптимизация полной экспериментальной матрицы

(8 составов) определила состав из 85 % каустического доломита, 15 % метакaoлина и 26 %-ного раствора MgCl_2 с расходом 45 % ($J/T=0,45$) в качестве синергически оптимального. Установленный состав повышает водостойкость почти в 2,5 раза по сравнению с эталоном ($R_f = 0,35 \rightarrow 0,87$) и создаёт научно-техническую основу для производства водостойких низкоуглеродистых магнезиальных вяжущих на региональном сырье Республики Каракалпакстан, включая доломит, каолин и десульфатированные буровые растворы нефтегазовой отрасли Устьюртского региона.

Abstract

This paper presents the physicochemical characterization of composite magnesium oxychloride cement (MOC) based on Jamansay-deposit dolomite and Khojakul-deposit kaolin, together with the results of compositional optimization achieved through metakaolin modification (0–20 %) at varying liquid-to-solid ratios of a fixed 26 %-concentration MgCl_2 solution (40–55 %). Dolomite was activated by selective calcination at 740–750°C, and kaolin was calcined at 750°C to produce metakaolin; both regimes were justified by TG-DTA-DTG and FTIR data. Dynamic 120-hour water-immersion tests showed that unmodified MOC undergoes structural leaching after 48 hours, whereas the 15 % metakaolin composition achieved complete hydraulic stability (softening coefficient $R_f = 0.87$; 67.3 MPa dry, 58.5 MPa after immersion). Multi-criteria optimization of the full experimental matrix (8 compositions) identified 85 % caustic dolomite + 15 % metakaolin + a 26 % MgCl_2 solution at a 45 % dosage ($L/S = 0.45$) as the synergistically optimal composition, nearly 2.5-fold more water-resistant than the unmodified reference ($R_f = 0.35 \rightarrow 0.87$). These findings provide a scientific and technical basis for producing water-resistant, low-carbon magnesial binders from regional Karakalpakstan raw materials, including dolomite, kaolin, and desulfated oilfield drilling brines from the Ustyurt region.

Ключевые слова: доломит, метакaoлин, магнезиальный оксихлоридный цемент, кинетика водопоглощения, структурное выщелачивание, коэффициент размягчения, водостойкость.

Keywords: dolomite, metakaolin, magnesium oxychloride cement, water-absorption kinetics, structural leaching, softening coefficient, water resistance.

Введение

Производство портландцемента, связанное с высокотемпературным (около 1450°C) обжигом известняка, обеспечивает около 7–8 % мировых антропогенных выбросов CO_2 [4, 6], что делает поиск низкоуглеродных вяжущих на региональном сырье актуальной научно-технической задачей. Перспективной альтернативой является магнезиальный оксихлоридный цемент (МОЦ, цемент Сореля) — с низкой температурой кальцинации (700–900°C), высокой ранней прочностью и способностью утилизировать промышленные отходы [10]; его основной прочностеобеспечивающей фазой служит игольчатая фаза $5\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ (5-фаза) [13], которая при длительном контакте с водой гидролитически разлагается, вызывая вымывание ионов MgCl_2 и снижение коэффициента размягчения до 0,30–0,50 [22]. Для решения этой проблемы применялись кислотные

модификаторы [23] и пуццолановые наполнители — зола-унос, метакраин, доменный шлак, стеклопорошок [11, 17, 20], однако ни один из методов по отдельности не устраняет проблему полностью; при этом большинство исследований опирается на чистый реагентный MgO [21], тогда как влияние регионального доломитового сырья на синтез МОЦ освещено сравнительно слабо [5].

В условиях Узбекистана импорт химически чистого зарубежного сырья MgO/MgCl₂ экономически нецелесообразен, что делает синтез водостойких композитов на основе регионального сырья Республики Каракалпакстан - доломита Джамансайского месторождения (источник реактивного MgO), каолина Хужакульского месторождения (источник метакраина) и отработанных буровых растворов нефтегазовой отрасли Устюртского региона (источник активатора MgCl₂) - актуальной научно-практической задачей.

Цель настоящей работы - установление физико-химических закономерностей повышения стойкости к структурному выщелачиванию и водостойкости МОЦ на основе доломита Джамансайского месторождения и каолина Хужакульского месторождения посредством оптимизации соотношения каустический доломит: метакраин (0–20 %) и расхода (Ж/Т, 40–55 %) активирующего раствора MgCl₂ постоянной концентрации 26 %, а также изучения кинетики динамического водопоглощения и структурного выщелачивания (120 ч). Дальнейшее повышение стойкости найденного оптимального состава к воде и циклам замораживания-оттаивания путём его обогащения ортофосфорной кислотой и стеклопорошком по стандартам ASTM представлено в отдельной публикации авторов.

Материалы и методы

Использовались сырьё месторождения доломитизированных пород Западный Джамансай (72,18 га, Караузякский район Республики Каракалпакстан) и каолин Хужакульского месторождения. Для активации применялись раствор MgCl₂·6H₂O чистотой ≥98 %, а также отработанный буровой раствор нефтегазовой отрасли Устюртского региона (MgCl₂ 8,5 г/л, NaCl 92 г/л), десульфатированный посредством Ba(OH)₂·8H₂O и Na₂CO₃ до SO₄²⁻ < 0,05 г/л.

Каустический доломит получали селективной кальцинацией в лабораторной муфельной печи при 740–750°C (90–120 мин) - режим обоснован данными ДТА и литературой по кинетике селективной кальцинации [16] и обеспечивает разложение решётки MgCO₃ без образования нестабильной свободной извести (CaO). Метакраин получали обжигом природного каолина при 750°C (2–3 ч) - в интервале между пиком дегидроксиляции каолинита (≈541,5°C) и границей образования муллита (≈993,8°C) по данным ТГ-ДТА-ДТГ. Сухие компоненты совместно механически и пуццоланово активировались в вибрационной цементной мельнице до d₅₀ ≤ 15 мкм.

Элементный и оксидный состав определяли методом EDXRF (Rigaku NEX DE; XRF Rigaku NEX CG II). Кристаллическую структуру и количественный фазовый состав - методом XRD-Ритвельда (Rigaku SmartLab). Термическое поведение - методом TG-DTA-DTG (NETZSCH STA 449 F3 Jupiter, 30–1000°C, 10°C/мин, воздух). Функциональные группы -

методом FTIR (Shimadzu IRTracer-100 / Bruker Alpha-P, 400–4000 см⁻¹, таблетирование с KBr). Удельную поверхность метакаолина определяли по методу Блейна (ГОСТ 310.2 – 76), истинную плотность - пикнометрическим методом.

Испытания проводились на кубических образцах размером 50×50×50 мм в соответствии с ГОСТ 10180/ASTM C109.

В двухкомпонентной системе часть массы каустического доломита замещалась метакаолином в количестве 0 % (эталон), 5 %, 10 %, 15 % и 20 %; раствор MgCl₂ готовился при постоянной концентрации 26 %, при этом его расход по отношению к массе сухой смеси (соотношение жидкое/твёрдое, Ж/Т) варьировался в диапазоне 40 %, 45 %, 50 % и 55 % (всего 8 основных составов, таблица 3). Сухие компоненты перемешивались всухую в течение 3 мин, после чего добавлялся рассчитанный объём раствора MgCl₂, и смесь интенсивно перемешивалась ещё 5 мин. Готовая смесь заливалась в кубические формы 50×50×50 мм, уплотнялась на вибростол в течение 60 с, после выдержки на воздухе в течение 24 ч (23±2°C, влажность 50±5 %) расплубливалась и оставлялась твердеть на воздухе в течение 28 сут. Прочность при сжатии измерялась по ГОСТ 10180 и ASTM C109 (скорость нагружения 0,5±0,1 МПа/с); от каждого состава испытывалось по 3 параллельных образца (n=3). Коэффициент водостойкости (размягчения) рассчитывался как $R_f = R_{\text{вода}} / R_{\text{сухой}}$, где $R_{\text{вода}}$ — прочность после выдержки в воде в течение 120 ч; при $R_f \geq 0,75$ материал относится к водостойкой группе. В отличие от стандартных методик ГОСТ 10180/ASTM C109, предусматривающих оценку водостойкости после 14 или 28 сут выдержки в воде, в настоящей работе выбран сокращённый срок 120 ч (5 сут): поскольку МОЦ, в отличие от портландцемента, склонен к быстрому структурному выщелачиванию 5-фазы уже в первые часы контакта с водой, именно этот интервал позволяет зафиксировать начальную динамику вымывания ионов MgCl₂ до наступления возможной вторичной стабилизации структуры. В отдельной серии определялась кинетика динамического водопоглощения и изменения массы образцов (n=3) от 1 до 120 ч с более частым шагом измерений для построения кинетических кривых.

Результаты и обсуждения

Химический состав природного доломита Джамансайского месторождения детально охарактеризован в более ранних работах [2, 1, 3]: содержание MgO составляет 24,1 %, CaO – 25,7 % при суммарном содержании примесных оксидов Fe₂O₃, Al₂O₃ и SiO₂ не более 2,2 % каждого, что подтверждает высокую магниевую-кальциевую чистоту сырья и его пригодность в качестве источника реактивного MgO.

Химический состав каустического доломита, полученного после термической активации, и пуццоланового модификатора - метакаолина - приведён в таблице 1.

Таблица 1.

Химический состав каустического доломита и метакаолина (масс. %, XRF)

Материал	MgO	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃ /TiO ₂	K ₂ O/Na ₂ O	П.п.п., %
Каустический доломит	32,70	34,87	2,90	1,40	2,96	0,580 (SO ₃)	0,16	24,43

Материал	MgO	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃ /TiO ₂	K ₂ O/Na ₂ O	П.п.п., %
Метакаолин	0,611	0,373	56,9	38,5	0,91	0,608 (TiO ₂)	1,804 (K ₂ O)	-

Данные химического состава, согласуясь с предыдущими исследованиями доломита Джамансайского месторождения [2, 1, 3], показывают, что в обожжённом джамансайском доломите (каустическом доломите) содержание MgO (32,70 %) и CaO (34,87 %) практически близки друг к другу: селективная кальцинация в режиме 740–750°C обеспечивает разложение решётки MgCO₃, тогда как каркас CaCO₃ в основном сохраняется в виде кальцита, что подтверждается остаточными рефлексами кальцита наряду с рефлексами периклаза (MgO) на рентгенограмме термически активированного доломита, представленной в более ранних работах [2, 1, 3]. Потери при прокаливании (24,43 %) соответствуют связанному CO₂ в составе сохранившегося карбонатного каркаса. Низкая концентрация примесных оксидов, таких как Fe₂O₃ (2,96 %) и Al₂O₃ (1,40 %), минимизирует риск образования нежелательных межфазных соединений в процессе гидратации. Образец метакаолина характеризуется чрезвычайно высоким содержанием аморфного алюмосиликата (SiO₂ = 56,9 %, Al₂O₃ = 38,5 %), что является основным движущим фактором последующих пуццолановых реакций в тесте МОЦ. Физико-механические характеристики метакаолина приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Физико-механические характеристики метакаолина

Наименование показателя	Значение	Метод испытания
Удельная поверхность, см ² /г	19 000	ГОСТ 310.2-76 (Блейн)
Истинная плотность, г/см ³	2,6	Пикнометр
Цвет	Светло-кремовый	Визуально

Чрезвычайно высокая удельная поверхность метакаолина (19 000 см²/г) позволяет частицам выполнять функцию микронаполнителя, уплотняя микроструктуру камня цемента Сореля и повышая его гидравлическую стойкость.

Рентгенофазовая (XRD) дифрактограмма природного каолина, природного доломита и их механической смеси приведена на рисунке 1: дифрактограмма чётко различает характерный основной рефлекс каолина ($2\theta \approx 12,3^\circ$, каолинит) и доминирующий рефлекс доломита ($2\theta \approx 31^\circ$); в смешанном образце рефлекссы обоих минералов наблюдаются совместно, что подтверждает присутствие компонентов в виде отдельных кристаллических фаз.

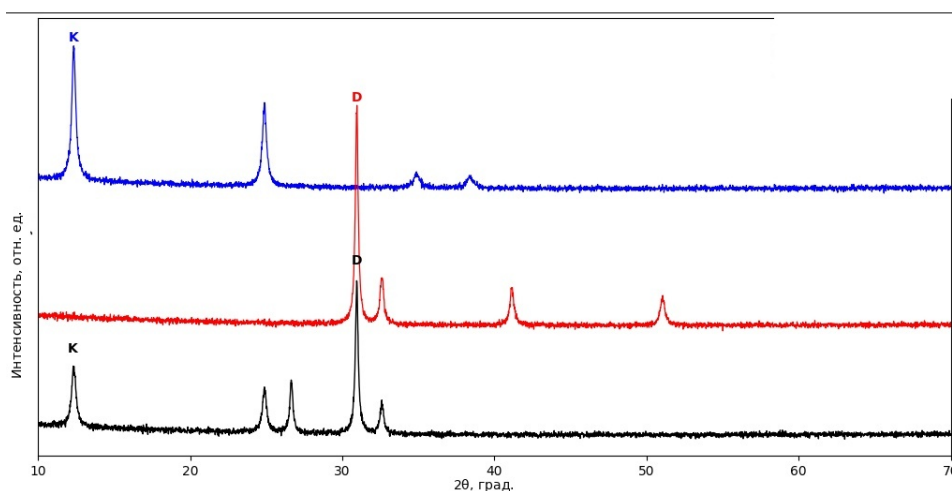


Рисунок 1. Рентгенограмма (XRD) каолина Хужакульского месторождения (K), доломита Джамансайского месторождения (D) и их механической смеси (K+D)

Рентгенофлуоресцентный (EDXRF) спектр и данные синхронного термического анализа (ДТА-ТГ) доломита Джамансайского месторождения подробно представлены в более ранних работах [2, 1, 3]. Согласно этим данным и расширенному ТГ-ДТА-ДТГ-анализу [8], термическая диссоциация доломита протекает в двух чётко выраженных макростадиях: первый глубокий эндотермический пик ($\approx 742,66^\circ\text{C}$) отражает селективное разложение решётки карбоната магния ($\text{MgCO}_3 \rightarrow \text{MgO} + \text{CO}_2\uparrow$), при котором соседняя решётка CaCO_3 ещё не подвергается структурному разрушению; второй макро-эндотермический пик ($\approx 908,75^\circ\text{C}$) определяет полное разложение оставшегося каркаса карбоната кальция до свободной извести ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2\uparrow$). Чёткое разделение термических сигналов при $742,66^\circ\text{C}$ и $908,75^\circ\text{C}$ подтверждает, что диапазон $740\text{--}750^\circ\text{C}$ является оптимальным окном термической обработки для получения активного каустического доломита без образования объёмно нестабильной свободной CaO .

ФТИР-спектроскопия образца доломита [12] показывает: широкую полосу поглощения при $\approx 3397\text{ см}^{-1}$ (валентные колебания гидроксильных групп адсорбированной влаги и глинистых примесей, поскольку сам доломит $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ безводен); асимметричное валентное колебание карбонатной группы (ν_3 , CO_3^{2-}) при $\approx 1424\text{ см}^{-1}$; и диагностические пики упорядоченной решётки доломита при $\approx 879\text{ см}^{-1}$ (ν_2 , внеплоскостной изгиб) и $\approx 728\text{ см}^{-1}$ (ν_4 , плоскостной изгиб). Значительное снижение глубины полос в карбонатной зоне после кальцинации и появление низкочастотных координационных связей $\text{Mg}\text{--}\text{O}$ подтверждают успешное разложение групп MgCO_3 и образование кристаллов активной каустической магнезии.

Специфическое термическое поведение каолина Хужакульского месторождения изучалось отдельно, что позволило научно обосновать окно кальцинации (750°C) для получения метакеолина (рис. 2).

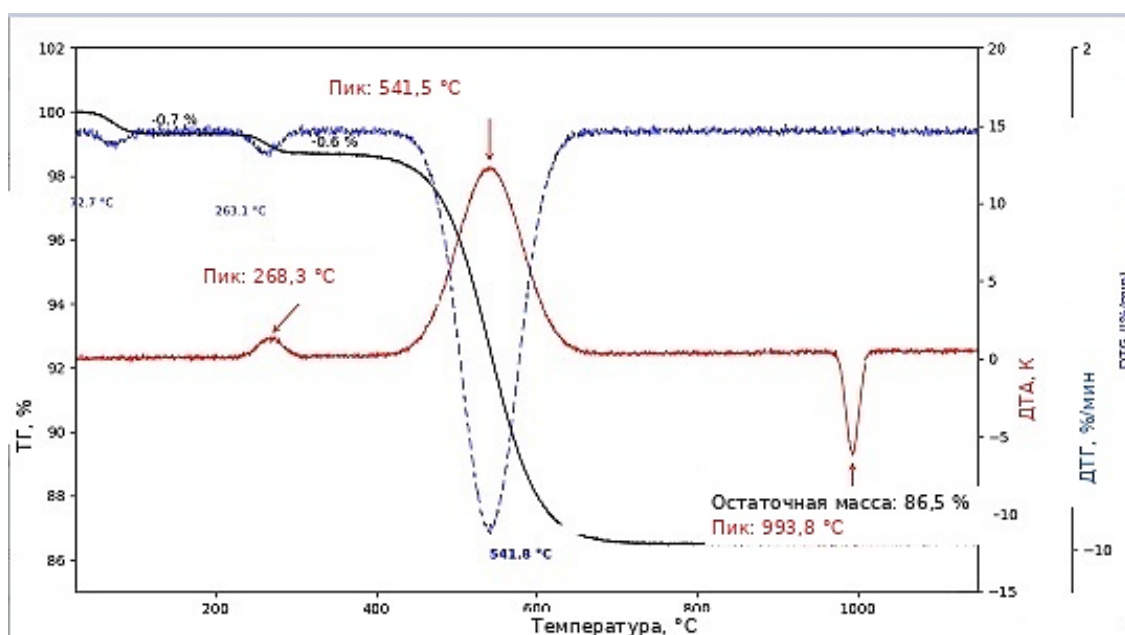


Рисунок 2. Кривые TG, ДТА и ДТГ каолина Хужакульского месторождения

На термограмме наблюдались три процесса: до 72,7°C – десорбция сорбированной влаги (потеря массы $\approx 0,7\%$); около 268,3°C – термическое окисление микроколичеств органических примесей (слабый экзотермический эффект); и основной процесс – глубокий эндотермический пик при 541,5–541,8°C, отражающий отделение групп OH^- решётки каолинита, то есть образование аморфной фазы метакеолина. В высокотемпературной зоне при 993,8°C зафиксирован острый экзотермический пик, не сопровождающийся потерей массы, что указывает на формирование новой кристаллической фазы (алюмокремниевой шпинели или зародышей муллита). Кальцинация при 750°C является оптимальной температурой для получения аморфного метакеолина с высокой пуццолановой активностью – выше пика дегидроксиляции (541,5°C), но значительно ниже границы образования муллита (993,8°C). Морфологические особенности частиц термически активированного доломита, изученные методом сканирующей электронной микроскопии, также подробно представлены в более ранних работах [2, 1, 3]: показано образование нанокристаллов активного MgO и рост пористости в зависимости от степени обжига, что создаёт благоприятные условия для реакционной способности минерала в последующих процессах гидратации.

Результаты полной экспериментальной матрицы, проведённой в двухкомпонентной системе (каустический доломит–метакеолин) при варьировании содержания метакеолина (0–20 %) и расхода 26 %-ного раствора MgCl_2 ($\text{Ж/Т}=40\text{--}55\%$), приведены в таблице 3.

Таблица 3.

Влияние расхода раствора MgCl_2 (26 %) и содержания метакеолина на физико-механические свойства и коэффициент размягчения МОЦ ($n=3$)

№	Метакеолин, %	MgCl_2 , % (Ж/Т)	$R_{\text{сх. 28 сут}}$, МПа	$R_{\text{вода 120 ч}}$, МПа	R_f
1	0 (эталон)	45	38,2 $\pm$ 1,2	13,4 $\pm$ 0,8	0,35
2	5	45	44,5 $\pm$ 1,4	21,8 $\pm$ 1,1	0,49
3	10	45	59,1 $\pm$ 1,8	42,5 $\pm$ 1,5	0,72
4	15	40	31,4 $\pm$ 1,1	23,2 $\pm$ 0,9	0,74
5	15	45	67,3 $\pm$ 2,1	58,5 $\pm$ 1,7	0,87

№	Метакаолин, %	MgCl ₂ , % (Ж/Т)	Rсух. 28 сут, МПа	Rвода 120 ч, МПа	Rf
6	15	50	34,5±1,3	26,9±1,2	0,78
7	15	55	29,1±0,9	21,2±0,8	0,73
8	20	45	45,2±1,6	33,4±1,4	0,74

В сравнении с близкими по направлению исследованиями структуры магниевых вяжущих на основе каустического доломита и метакаолина [15], немодифицированный эталонный образец (0 % МК, Ж/Т=45 %) показал низкий коэффициент размягчения ($R_f = 0,35$: $R_{сух} = 38,2$ МПа, $R_{вода} = 13,4$ МПа), что подтверждает недостаточную водостойкость традиционного МОЦ: под воздействием воды кристаллы 5-фазы подвергаются гидролитическому разложению с вымыванием ионов Cl^- . Многокритериальная оптимизация содержания метакаолина (0–20 %) и расхода раствора $MgCl_2$ (Ж/Т=40–55 %, табл. 3) выявила оптимальный состав – 15 % метакаолина, Ж/Т=0,45, — при котором прочность достигает максимума: $R_{сух} = 67,3 \pm 2,1$ МПа, $R_{вода} = 58,5 \pm 1,7$ МПа, $R_f = 0,87$ (рис. 3), то есть почти в 2,5 раза выше эталона. Влияние расхода раствора $MgCl_2$ на прочность МОЦ признано в литературе одним из основных факторов [19].

Влияние содержания метакаолина и расхода раствора $MgCl_2$ на прочность МОЦ

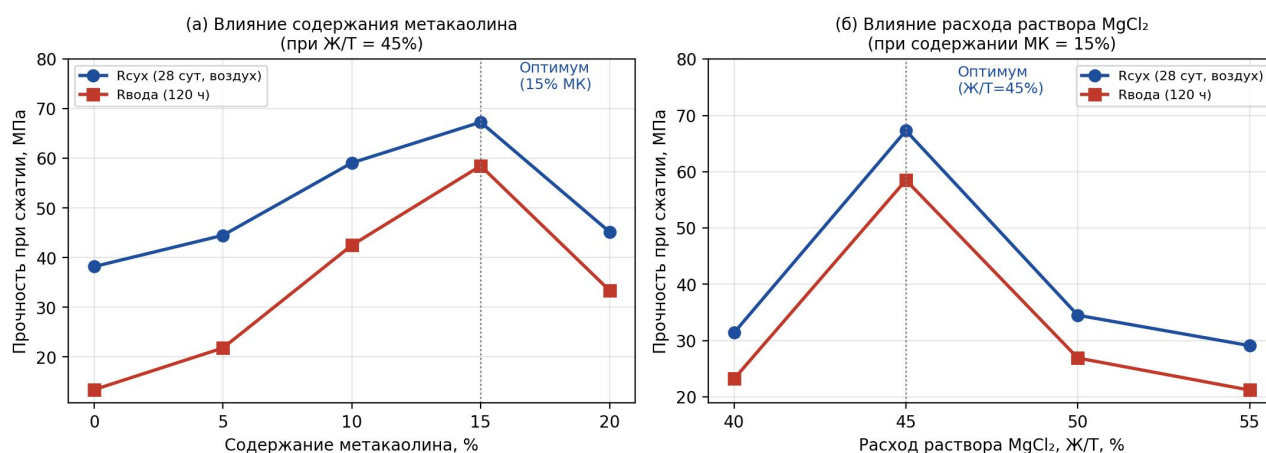


Рисунок 3. Влияние содержания метакаолина (при Ж/Т=45 %) и расхода раствора $MgCl_2$ (при 15 % МК) на прочность МОЦ при сжатии. Оптимум: 15 % МК, Ж/Т=45 % - 67,3 МПа

Таким образом, многокритериальная оптимизация определила состав из 85 % каустического доломита + 15 % метакаолина + 26 %-ного раствора $MgCl_2$ с расходом 45 % (Ж/Т=0,45) в качестве оптимального (синергического) состава для данного регионального сырьевого комплекса.

Кинетика динамического водопоглощения и изменения массы модифицированных образцов МОЦ ($n=3$) от 1 до 120 ч приведена на рисунке 4.

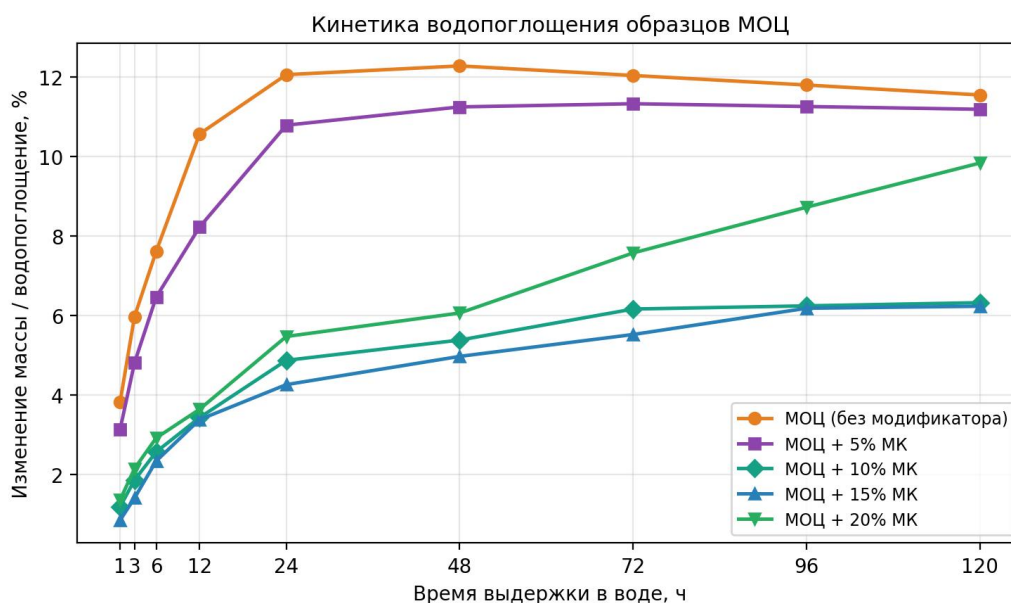


Рисунок 4. Кинетика водопоглощения образцов МОЦ в зависимости от времени выдержки в воде (без модификатора и составы с 5–20 % МК)

Немодифицированный эталонный образец после контакта с водой продемонстрировал быстрое капиллярное впитывание: за 1 ч масса возросла на 3,82 %, а к 48 ч — на 12,27 %. После 48 ч в профиле массы наблюдалось непрерывное снижение с 12,27 % до 11,54 % к 120 ч, что свидетельствует о структурном выщелачивании (leaching): игольчатые кристаллы 5-фазы, образующие прочностной каркас материала, подвергаются химическому разложению, превращаясь в легкорастворимые ионы хлорида магния, вымываемые в водную среду.

Введение метакеолина резко сместило кривые водопоглощения вниз. Наилучший профиль влагостойкости зафиксирован в образце с добавкой 15 % МК: показатель 24-часового водопоглощения составил всего 4,26 % (у эталона — 12,05 %). В образцах с содержанием МК 10 % и 15 % процессы потери массы (выщелачивания) после 48 ч полностью прекратились, кривые стабилизировались к 120 ч на уровне 6,32 % и 6,23 % соответственно. Это объясняется двумя синергическими механизмами [7]: эффектом пуццоланового микронаполнения (мелкие частицы метакеолина механически разрушают цепь капиллярных пор) и химической реакцией (активные SiO_2 и Al_2O_3 метакеолина реагируют со свободными ионами Mg^{2+} и OH^- в поровом растворе, образуя нерастворимые в воде гелевые фазы М-С-Н и М-А-С-Н, изолирующие кристаллы 5-фазы от молекул воды). При содержании модификатора 20 % водопоглощение вновь возросло (9,83 % за 120 ч) из-за избыточной водопотребности и локальной агломерации кластеров МК, что подтверждает достижение наилучшего баланса между влагозащитой и структурной плотностью в диапазоне 10–15 % МК.

В литературе коэффициент водостойкости/размягчения магниезальных вяжущих принято обозначать как R_w (в настоящей работе — R_f , та же величина $R_{\text{вода}}/R_{\text{сухой}}$); для модификации только метакеолином приводятся значения $R_w = 0,50\text{--}0,62$ [9, 17, 20]. При содержании метакеолина 5 % в настоящей работе получено близкое значение ($R_f = 0,49$), а уже при 10 % ($R_f = 0,72$) — показатель, превышающий верхнюю границу этого диапазона. Систематическая совместная оптимизация содержания метакеолина и соотношения Ж/Т

раствора MgCl_2 довела итоговый показатель до $R_f = 0,87$ (15 % МК, $J/T=0,45$) - выше большинства ранее опубликованных результатов для аналогичных систем на основе каустического доломита и метакеолина [15], что является одним из практических вкладов данной работы.

Важной особенностью исследования является то, что данные результаты впервые получены не на основе реагентного чистого MgO/MgCl_2 , а на основе регионального сырья - доломита Джамансайского месторождения и каолина Хужакульского месторождения, а также с использованием десульфатированного отработанного бурового раствора нефтегазовой отрасли Устюртского региона в качестве альтернативного источника активатора MgCl_2 . Это открывает возможность направления отходов растворов нефтегазовой промышленности, обычно утилизируемых закачкой в глубокие скважины или выпариванием, на производство МОЦ, что соответствует принципам циркулярной экономики и снижения углеродного следа [14, 18].

Заключение

Доломит Джамансайского месторождения (MgO 24,1 %, CaO 25,7 %) и каолин Хужакульского месторождения обладают высокой химической чистотой и подходящими характеристиками для применения в производстве магнезиальных вяжущих в качестве источников реактивного MgO и пуццолано-активного метакеолина. На основе данных ТГ-ДТА-ДТГ и ФТИР научно обоснованы технологические режимы кальцинации - $740\text{--}750^\circ\text{C}$ и 750°C соответственно — для доломита (двухстадийная декарбонизация при $742,66^\circ\text{C}$ и $908,75^\circ\text{C}$) и каолина (дегидроксиляция при $541,5^\circ\text{C}$, граница образования муллита при $993,8^\circ\text{C}$). Многокритериальная оптимизация соотношения каустический доломит: метакеолин и расхода 26 %-ного раствора MgCl_2 определила состав 85 % каустического доломита + 15 % метакеолина + раствор MgCl_2 ($J/T=0,45$) в качестве синергически оптимального: 28-суточная прочность в сухом состоянии - 67,3 МПа, после выдержки в воде 120 ч - 58,5 МПа, коэффициент размягчения $R_f = 0,87$ (рост в $\approx 2,5$ раза относительно эталона).

Испытания динамического водопоглощения подтвердили полное прекращение процесса структурного выщелачивания при содержании метакеолина 10–15 %, что объясняется синергией пуццоланового микронаполнения капиллярных пор и химической реакции метакеолина с образованием нерастворимых гелевых фаз М-С-Н и М-А-С-Н, изолирующих кристаллы 5-фазы от воды. Полученные результаты служат научно-технической основой для организации производства низкоуглеродных, гидратационно стабильных магнезиальных вяжущих материалов на основе регионального сырья - доломита Джамансайского месторождения и метакеолина Хужакульского месторождения; дальнейшее повышение водо- и морозостойкости найденного оптимального состава путём его тройной модификации ортофосфорной кислотой и стеклопорошком рассматривается на втором этапе исследовательской программы.

Список литературы

1. Абылова А.Ж., Сайпов А.А., Бекбосынова Р.Ж., Абылов Ж.Ж. Фазообразование и физико-химические свойства магнезиевого оксихлоридного цемента, синтезированного из каустического доломита // Инжиниринг и экономика. – 2026. – № 5. – DOI: 10.5281/zenodo.17111236.
2. Нурымбетов Б.Ч., Туремуратов Ш.Н., Мавлонов Ж.Б., Чимбергенова Г.Б. Изучение доломита Джамансайского месторождения // Universum: технические науки. – 2022. – Т. 12, № 105.
3. Туремуратов Ш.Н., Бекбосынова Р.Ж., Сайпов А.А., Абылов Ж.Ж. Исследование физико-химических процессов доломита Джамансайского месторождения // Development of Science. – 2025. – Т. 3, № 11. URL: <https://devos.uz/article.php?id=2515>.
4. Ahmad F., Rawat S., Zhang Y. Magnesium oxychloride cement: development, opportunities and challenges // Appl. Sci. – 2024. – Т. 14, № 7.
5. Altiner M. Dolomite as a raw material for magnesium oxychloride cement production // Mater. Sci. Forum. – 2024. – Т. 1071.
6. Amran M., Fediuk R., Murali G., Avudaiappan S., Ozbakkaloglu T. Global carbon recoverability experiences from the cement industry // Case Stud. Constr. Mater. – 2022. – Т. 17.
7. Bernard E., Lothenbach B., Chlique C., Wyrzykowski M., Dauzères A., Pochard I. Characterization of magnesium silicate hydrate (M-S-H) // Cem. Concr. Res. – 2019. – Т. 116. – DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.09.007.
8. Galai H., Piga L., Pirtoli D. Thermal decomposition of natural dolomite containing organic impurities: a TG-DTA approach // Thermochim. Acta. – 2018. – Т. 660.
9. Gong W., Wang N., Zhang N. Effect of metakaolin on water resistance of magnesium oxychloride cement // ACI Mater. J. – 2022. – Т. 119, № 1.
10. Guo Y., Zhang Y., Soe K. Recent development in magnesium oxychloride cement // Struct. Concr. – 2018. – Т. 19.
11. Guo Y., Zhang Y., Soe K. Effect of fly ash on mechanical properties of magnesium oxychloride cement under water attack // Struct. Concr. – 2020. – Т. 21.
12. Ji J., Zhang L., Geng J. Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy analysis of structural evolution in calcined dolomite and carbonation products // J. Mol. Struct. – 2021. – Т. 1245.
13. Jiříčková A., Lojka M., Lauermannová A.M., Antonovič V., Pavlík Z., Jankovský O. Jiříčková A., Lojka M., Lauermannová A.M., Antonovič V., Pavlík Z., Jankovský O. Synthesis, structure, and thermal stability of magnesium oxychloride $5\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ // Appl. Sci. – 2020. – Т. 10.
14. Kastiukas G. et al. Environmental assessment case study of magnesium oxychloride cement // J. Clean. Prod. – 2025. – Т. 378.
15. Khaliullin M.I., Rakhimov R.Z. Structure development and phase composition of magnesium binders based on caustic dolomite and metakaolin // Izvestiya KGASU. – 2025. – № 4.

16. Li Y., Wang X. Selective calcination kinetics of natural dolomite for the preparation of high-activity caustic dolomite binder // *Ind. Eng. Chem. Res.* – 2017. – Т. 56, № 12.
17. Rashad A.M. Metakaolin as cementitious material: history, scours, production and composition – a comprehensive overview // *Constr. Build. Mater.* – 2013. – Т. 41.
18. Ruan S., Unluer C. Comparative life-cycle assessment of reactive MgO vs Portland cement production // *Int. J. Life Cycle Assess.* – 2024. – Т. 29.
19. Singh A., Wei K., Yang Y., Yu Q., Lyu X. Factors influencing the strength of magnesium oxychloride cement // *Constr. Build. Mater.* – 2021. – Т. 284.
20. Sreenivasan H., Bernard E., Santos H.S., Le Bescop P., Lothenbach B. A critical review of magnesium silicate hydrate (M-S-H) phases for binder applications // *Cem. Concr. Res.* – 2024. – Т. 178.
21. Tan Y., Liu Y., Grover L. Review of reactive magnesia-based cementitious materials: current developments and potential applicabilities // *J. Build. Eng.* – 2021. – Т. 40.
22. Walling S.A., Provis J.L. Magnesia-based cements: a journey of 150 years, and cements for the future // *Chem. Rev.* – 2016. – Т. 116, № 7.
23. Wen J., Yu H.F., Li Y. Effects of H_3PO_4 and $Ca(H_2PO_4)_2$ on mechanical properties and water resistance of thermally decomposed magnesium oxychloride cement // *J. Cent. South Univ.* – 2013. – Т. 20.

References

1. Abylova A.Zh., Saipov A.A., Bekbosynova R.Zh., Abylov Zh.Zh. Fazoobrazovanie i fiziko-khimicheskie svoystv magnievogo oksikhlordnogo tsementa, sintezirovannogo iz kausticheskogo dolomita [Phase formation and physicochemical properties of magnesium oxychloride cement synthesized from caustic dolomite]. *Inzhiniring i ekonomika*, 2026, no. 5, P. 1141–1149. DOI: 10.5281/zenodo.17111236. (In Russ.)
2. Nurymbetov B.Ch., Turemuratov Sh.N., Mavlonov Zh.B., Chimbergenova G.B. Jamansoy koni dolomitini o'rganish [Study of the dolomite of the Jamansay deposit]. *Universum: tekhnicheskie nauki*, 2022, vol. 12, no. 105, P. 78–85. (In Uzbek).
3. Turemuratov Sh.N., Bekbosynova R.Zh., Saipov A.A., Abylov Zh.Zh. Issledovanie fiziko-khimicheskikh protsessov dolomita Dzhamansayskogo mestorozhdeniya [Study of the physicochemical processes of dolomite from the Jamansay deposit]. *Development of Science*, 2025, vol. 3, Available at: – No. 11. – URL: <https://devos.uz/article.php?id=2515> (дата обращения: 09.09.2026). (In Russ.)
4. Ahmad F., Rawat S., Zhang Y. Magnesium oxychloride cement: development, opportunities and challenges. *Appl. Sci.*, 2024, vol. 14, no. 7, P. 3074.
5. Altiner M. Dolomite as a raw material for magnesium oxychloride cement production. *Mater. Sci. Forum*, 2024, vol. 1071, P. 98–110.
6. Amran M., Fediuk R., Murali G., Avudaiappan S., Ozbakkaloglu T. Global carbon recoverability experiences from the cement industry. *Case Stud. Constr. Mater.*, 2022, vol. 17, P. e01439.

7. Bernard E., Lothenbach B., Chlique C., Wyrzykowski M., Dauzères A., Pochard I. Characterization of magnesium silicate hydrate (M-S-H). *Cem. Concr. Res.*, 2019, vol. 116, P. 309–330 – DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.09.007.
8. Galai H., Piga L., Pirtoli D. Thermal decomposition of natural dolomite containing organic impurities: a TG-DTA approach. *Thermochim. Acta*, 2018, vol. 660, P. 45–52.
9. Gong W., Wang N., Zhang N. Effect of metakaolin on water resistance of magnesium oxychloride cement. *ACI Mater. J.*, 2022, vol. 119, no. 1, P. 47–57.
10. Guo Y., Zhang Y., Soe K. Recent development in magnesium oxychloride cement. *Struct. Concr.*, 2018, vol. 19, P. 1290–1300.
11. Guo Y., Zhang Y., Soe K. Effect of fly ash on mechanical properties of magnesium oxychloride cement under water attack. *Struct. Concr.*, 2020, vol. 21, P. 1297–1310.
12. Ji J., Zhang L., Geng J. Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy analysis of structural evolution in calcined dolomite and carbonation products. *J. Mol. Struct.*, 2021, vol. 1245, P. 131012.
13. Jiříčková A., Lojka M., Lauermannová A.M., Antonovič V., Pavlík Z., Jankovský O. Jiříčková A., Lojka M., Lauermannová A.M., Antonovič V., Pavlík Z., Jankovský O. Synthesis, structure, and thermal stability of magnesium oxychloride $5\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$. *Appl. Sci.*, 2020, vol. 10, P. 1683 // *Appl. Sci.* – 2020. – Vol. 10.
14. Kastiukas G. et al. Environmental assessment case study of magnesium oxychloride cement. *J. Clean. Prod.*, 2025, vol. 378, P. e134612.
15. Khaliullin M.I., Rakhimov R.Z. Structure development and phase composition of magnesium binders based on caustic dolomite and metakaolin. *Izvestiya KGASU*, 2025, no. 4 (74), P. 78–85.
16. Li Y., Wang X. Selective calcination kinetics of natural dolomite for the preparation of high-activity caustic dolomite binder. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2017, vol. 56, no. 12, P. 3211–3220.
17. Rashad A.M. Metakaolin as cementitious material: history, scours, production and composition – a comprehensive overview. *Constr. Build. Mater.*, 2013, vol. 41, P. 303–318.
18. Ruan S., Unluer C. Comparative life-cycle assessment of reactive MgO vs Portland cement production. *Int. J. Life Cycle Assess.*, 2024, vol. 29, P. e1547.
19. Singh A., Wei K., Yang Y., Yu Q., Lyu X. Factors influencing the strength of magnesium oxychloride cement. *Constr. Build. Mater.*, 2021, vol. 284, P. 122844.
20. Sreenivasan H., Bernard E., Santos H.S., Le Bescop P., Lothenbach B. A critical review of magnesium silicate hydrate (M-S-H) phases for binder applications. *Cem. Concr. Res.*, 2024, vol. 178, P. 107462.
21. Tan Y., Liu Y., Grover L. Review of reactive magnesia-based cementitious materials: current developments and potential applicabilities // Review of reactive magnesia-based cementitious materials: current developments and potential applicabilities. *J. Build. Eng.* – 2021. – Vol. 40.
22. Walling S.A., Provis J.L. Magnesia-based cements: a journey of 150 years, and cements for the future. *Chem. Rev.*, 2016, vol. 116, no. 7, P. 4170–4204.

-
23. Wen J., Yu H.F., Li Y. Effects of H_3PO_4 and $Ca(H_2PO_4)_2$ on mechanical properties and water resistance of thermally decomposed magnesium oxychloride cement. J. Cent. South Univ., 2013, vol. 20, P. 2007–2013.

ТРАНСПОРТ И ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

Статья поступила в редакцию: 08.09.2026

Статья принята к публикации: 13.09.2026

Статья опубликована: 28.09.2026

УДК 629.3.014.2+621.833

Анализ факторов, влияющих на эксплуатационную надёжность зубчатых передач редуктора электромобиля

Нусратова Нигина Рустамовна

инженер

ООО ADM Jizzakh

Республика Узбекистан, г. Джизак

E-mail: nusratova.nigina.17@gmail.com

Ишмуратов Хикмат Кахарович

PhD, проф.

Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова

Республика Узбекистан, г. Ташкент

Analysis of factors affecting the operational reliability of electric vehicle reduction-gear transmissions

Nusratova Nigina Rustamovna

Engineer, ADM Jizzakh LLC

Uzbekistan, Jizzakh

Ishmuratov Khikmat Kakharovich

PhD, Professor

Tashkent State Technical University named after Islam Karimov

Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

Цель исследования – систематизировать эксплуатационные факторы, определяющие надёжность зубчатых передач редуктора электромобиля, и выделить параметры, которые целесообразно контролировать в последующих экспериментальных исследованиях. Методика основана на сравнительном анализе современных работ по высокоскоростным зубчатым передачам электромобильных трансмиссий и на расчётном исследовании для одноступенчатой передачи. Рассмотрены нагрузка, частота вращения, температура, условия смазывания, вибрация и износ. Для расчётной части принято число зубьев ведущей шестерни $z_1 = 24$; при изменении частоты вращения от 4 000 до 16 000 об/мин частота зацепления возрастает от 1600 до 6 400 Гц. Показано, что повышение скорости не следует оценивать

Библиографическое описание: Нусратова Н.Р., Ишмуратов Х.К. Анализ факторов, влияющих на эксплуатационную надёжность зубчатых передач редуктора электромобиля // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 9(150). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23396>

изолированно: оно одновременно изменяет динамику зацепления, тепловой режим и требования к формированию смазочного слоя. Сформирована причинно-следственная схема «нагрузка и скорость – контактно-тепловые условия – смазывание – трение и износ – вибрация – надёжность». Практическая значимость работы состоит в выборе измеряемых параметров для будущего стендового исследования: крутящего момента, частоты вращения, температуры масла, вибрации и состояния поверхности зубьев. Предложенный подход может использоваться как исходная методика для оценки технического состояния и дальнейшего прогнозирования остаточного ресурса редуктора.

Abstract

The study aims to systematize operating factors governing the reliability of electric-vehicle reduction-gear transmissions and to identify parameters suitable for subsequent experimental monitoring. The method combines a comparative analysis of recent studies on high-speed EV gears with a transparent calculation study for a single-stage gear pair. Load, rotational speed, temperature, lubrication, vibration and wear are considered. For the calculation, the driving gear is assumed to have 24 teeth; increasing its speed from 4,000 to 16,000 rpm raises the gear-mesh frequency from 1,600 to 6,400 Hz. The analysis shows that speed should not be treated as an isolated factor because it simultaneously changes mesh dynamics, thermal conditions and lubricant-film requirements. A causal chain linking load and speed, contact and thermal conditions, lubrication, friction and wear, vibration, and reliability is proposed. The practical outcome is a set of parameters for future bench testing: torque, speed, oil temperature, vibration and tooth-surface condition. The approach can support further assessment of gearbox technical condition and residual-life prediction.

Ключевые слова: электромобиль, редуктор, зубчатая передача, надёжность, смазывание, износ, вибрация.

Keywords: electric vehicle, reduction gearbox, gear transmission, reliability, lubrication, wear, vibration.

Введение

Электрификация автомобильного транспорта изменяет условия работы механической части силового привода. В большинстве легковых электромобилей электрическая машина связана с ведущими колёсами через компактный редуктор, работающий в широком диапазоне частот вращения и при быстро меняющемся крутящем моменте. Для высокоскоростных передач это усиливает требования к состоянию поверхностей зубьев, смазыванию, отводу тепла и виброакустическим характеристикам [2, 3].

Редуктор электромобиля работает в широком диапазоне момента и частоты вращения. Снижение вязкости масла уменьшает потери, но повышает требования к смазочной плёнке [3], а старение масла изменяет его свойства [1].

Динамика зацепления зависит от зубцовой частоты, погрешностей профиля и контактной жёсткости; вибрация является важным диагностическим признаком [7, 8].

Цель работы – систематизировать факторы надёжности зубчатой передачи и расчётно оценить влияние частоты вращения на зубцовую частоту.

Материалы и методы

Объект исследования – зубчатая передача одноступенчатого редуктора электромобиля; предмет – влияние эксплуатационных факторов на её техническое состояние.

Проведён сравнительный анализ публикаций 2022–2026 гг. по высокоскоростным EV-передачам, смазыванию, вибрации и износу [1–10]. Факторы сгруппированы по схеме «воздействие – параметр – повреждение».

На втором этапе проведено расчётное исследование, не имитирующее конкретную серийную трансмиссию. Его задача – количественно показать влияние частоты вращения ведущей шестерни на частоту повторения контакта зубьев. Для модельной зубчатой пары принято число зубьев ведущей шестерни $z_1 = 24$. Частота зацепления определялась по выражению $f_m = z_1 \cdot n / 60$, где n - частота вращения ведущей шестерни, об/мин. Рассмотрены четыре режима: 4 000, 8 000, 12 000 и 16 000 об/мин. Такой расчёт не заменяет испытание на стенде и используется только как воспроизводимая оценка динамического возбуждения.

Результаты и обсуждение

Анализ источников выделил шесть основных факторов: нагрузку, частоту вращения, температуру, состояние смазочного материала, вибрацию и износ. Высокая скорость повышает требования к зубчатым колёсам, подшипникам и смазыванию [3], а испытания трансмиссионных масел подтверждают необходимость учитывать изменение их свойств в эксплуатации [1].

Для модельной шестерни с $z_1 = 24$ расчёт дал частоту зацепления 1 600 Гц при 4 000 об/мин, 3 200 Гц при 8 000 об/мин, 4 800 Гц при 12 000 об/мин и 6 400 Гц при 16 000 об/мин. Таким образом, четырёхкратное увеличение частоты вращения приводит к четырёхкратному росту частоты периодического зубцового возбуждения. Это не означает автоматического четырёхкратного роста износа, однако показывает, что число циклов контакта и спектральная область вибрации существенно меняются.

Таблица 1.

Связь эксплуатационных факторов с контролируемыми параметрами

Фактор	Физическое действие	Контролируемый параметр	Вероятное проявление
Нагрузка	Контактные напряжения и деформация	Крутящий момент	Усталость, pitting
Частота вращения	Частота контактов и динамическое возбуждение	об/мин, частота зацепления	Вибрация, тепловые потери
Температура	Изменение вязкости и условий плёнообразования	Температура масла	Рост трения/износа
Смазывание	Разделение контактирующих поверхностей	Состояние/вязкость масла	Scuffing, micropitting
Вибрация	Отражает динамику зацепления и дефекты	Ускорение, спектр	Диагностический признак
Износ	Изменение профиля и шероховатости	Состояние поверхности	Шум, вибрация, снижение ресурса

Полученная зависимость задаёт диапазон зубцовых частот для будущего вибрационного контроля; вибрацию следует оценивать совместно с нагрузкой и температурой [7, 8].

Смазочный материал снижает трение и участвует в отводе тепла. Для высокоскоростных EV-передатчиков свойства масла должны соответствовать конструкции и режиму работы редуктора [10, 3]; поэтому температуру масла целесообразно контролировать в эксперименте.

Сформирована причинная цепочка: нагрузка и скорость → контактно-тепловые условия → состояние смазочного слоя → трение и износ → вибрация и шум → снижение надёжности.

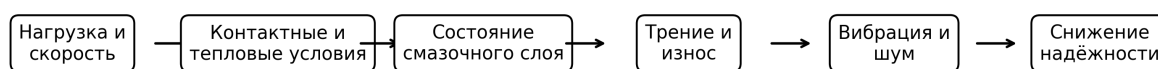


Рисунок 1. Причинно-следственная модель снижения эксплуатационной надёжности (составлено автором)

Заключение

1. Эксплуатационная надёжность зубчатой передачи редуктора электромобиля определяется совместным влиянием нагрузки, частоты вращения, температуры, смазывания, вибрации и износа; оценка одного параметра без учёта режима работы недостаточна.

2. Расчётное исследование для ведущей шестерни с 24 зубьями показало рост частоты зацепления с 1 600 до 6 400 Гц при увеличении частоты вращения с 4 000 до 16 000 об/мин. Полученный диапазон может использоваться при выборе параметров вибрационного контроля в последующих испытаниях.

3. В дальнейшем целесообразно синхронно регистрировать крутящий момент, частоту вращения, температуру масла и вибрацию, сопоставляя их с состоянием поверхности зубьев.

Список литературы

1. Barglik E., Stępień Z., Skibińska A., Krasodowski W. et al. Research and operational challenges of electric vehicles gear oils: Scientific Reports. 2026. Vol. 16. Art. 988. DOI: 10.1038/s41598-025-30653-7.
2. Dave S., Neufond J., Nordmann R., Rinderknecht S. A fundamental investigation of the interaction and impact of controlled torque ripples on gear mesh dynamics // Applied and Computational Mechanics. – 2023. – Т. 17, № 2. – P. 105–109. – DOI: 10.24132/acm.2023.838.
3. García-Tuero A., Ramajo B., Valbuena G.D. et al. Automatic Transmission Fluids in Electrified Transmissions: Compatibility with Elastomers: Applied Sciences. 2022. Vol. 12. Art. 6213. DOI: 10.3390/app12126213.
4. König T., Cadau L., Steidle L. et al. A concept for comparison of new and aged lubricants in transmissions of electric vehicles and a method of oil aging on a test rig: Forschung im Ingenieurwesen. 2023. Vol. 87. P. 1069–1080. DOI: 10.1007/s10010-023-00705-3.
5. Newcomb T. A brief review of the rapid transformation of driveline lubricants for hybrid electric and electric vehicles: Frontiers in Mechanical Engineering. 2023. Vol. 9. Art. 1139385. DOI: 10.3389/fmech.2023.1139385.

6. Polák J. Investigation of Tooth Friction Conditions of Electric Vehicle Gearbox with Plastic Gears: Engineering Proceedings. 2024. Vol. 79. Art. 85. DOI: 10.3390/engproc2024079085.
7. Shi Z., Liu S., Yue H., Wu X. Noise analysis and optimization of the gear transmission system for two-speed automatic transmission of pure electric vehicles: Mechanical Sciences. 2023. Vol. 14. P. 333–345. DOI: 10.5194/ms-14-333-2023.
8. Zhang Q., Chen S., Yuan Y. et al. Analysis and optimization of vibration characteristics of planetary gear transmission for electric vehicles: Journal of Fujian University of Technology. 2023. Vol. 21, No. 6. P. 566–572. DOI: 10.3969/j.issn.1672–4348.2023.06.009.
9. Zhmud B., Merelli M. Modern Tools for Tribological Optimization of EV Transmissions and e-Axles: SAE Technical Paper 2024-24-0013. 2024. DOI: 10.4271/2024-24-0013.
10. Zhmud B., Najjari M., Brodmann B. The Effects of the Lubricant Properties and Surface Finish Characteristics on the Tribology of High-Speed Gears for EV Transmissions: Lubricants. 2024. Vol. 12, No. 4. Art. 112. DOI: 10.3390/lubricants12040112.

UNIVERSUM: ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Электронный научный журнал

№ 9(150)

Сентябрь 2026 г.

Часть 5

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»

Объем издания: 100 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: 28.09.2026

Журнал размещается в:

CYBERLENINKA

e НАУЧНАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ
БИБЛИОТЕКА
LIBRARY.RU

Google
scholar

U **ULRICHSWEB**
GLOBAL SERIALS DIRECTORY

>BASE

СОЦИОНЕТ

OpenAIRE



Registry of Open Access
Repositories (ROAR)