

8(149)

Владимир Михайлович Чаплин (28 июля (9 августа) 1861 — 10 ноября 1931) — русский и советский учёный, специалист в области отопительно-вентиляционной техники.

Дед писательницы Веры Чаплиной[2].
Потомственный дворянин из рода Чаплиных, восходящего[3] ко Льву Чаплину (середина XV века)[4].

В 1883 году окончил Императорское Московское техническое училище (ИМТУ), а в 1898 году получил в училище должность профессора. В 1898—1909 гг. также преподавал в Московском Училище живописи, ваяния и зодчества.

В 1895 году вместе с коллегой по ИМТУ архитектором В. Г. Залесским Чаплин организовал торговый дом «В. Залесский и В. Чаплин». В 1902 году Залесский и Чаплин построили собственный дом на Большой Дмитровке, 16, в котором их семьи имели по отдельному этажу и где располагались помещения их технической конторы[5]. Среди реализованных проектов торгового дома «В. Залесский и В. Чаплин» — системы отопления и вентиляции почти 1500 зданий[6] в десятках городах Российской Империи: Музей изящных искусств имени императора Александра III, Румянцевский музей, Политехнический музей, Аудиторный корпус Московского университета, Императорское Московское техническое училище, Московское училище живописи, ваяния и зодчества, Александровское военное училище, Брестский (Белорусский) вокзал, автозавод А. М. О., Сандуновские бани, гостиница Метрополь, ресторан Эрмитаж, здание страхового общества «Россия», Алексеевская глазная больница, странноприимный дом Шереметева, храм Василия Блаженного, склеп великого князя Сергея Александровича в Чудовом монастыре, Перервинский монастырь, Заиконоспасский монастырь, храм Марфо-Мариинской обители — все в Москве; храм-усыпальница Юсуповых в Архангельском, Петербургская городская детская больница, Путиловский завод, Архангельские городские ряды, Нижегородский городской театр, Киевский коммерческий институт, царский дворец в Ливадии, Иркутский завод «Треугольник», детская больница в Баку, фабрика Столыпина в Пензе, храм Казанской Божией матери в Риге, электрическая станция в Рязани, Тамбовский пороховой завод, Волжский Канальный банк в Самаре, Калужское Епархиальное училище, Императорский Харьковский университет и многие другие.

В 1903 году В. М. Чаплин создал первую в России систему водяного отопления с радиаторами. Предложенная им водяная система была прототипом широко применяемых в настоящее время систем отопления с радиаторами. Система была запатентована, а также получила признание на всемирной выставке в Париже 1904 года.



165 ЛЕТ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ
9 августа 2026 г.

ЧАПЛИН
ВЛАДИМИР МИХАЙЛОВИЧ
1861-1931 гг.



UNIVERSUM: ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Научный журнал

Издается ежемесячно с ноября 2013 года

Выпуск: 8(149)

Август 2026 г.

Часть 3

Новосибирск
2026

Главный редактор журнала:

Звездина Марина Юрьевна – д-р физ.-мат. наук, доц.

Редакционная коллегия:

Абдуллин Тимур Зуфарович – канд. техн. наук;

Колесников Александр Сергеевич – канд. техн. наук, проф.;

Манасян Сергей Керопович – д-р техн. наук, проф.;

Мартышкин Алексей Иванович – канд. наук, доц.;

Мерганов Аваз Мирсултанович – 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.;

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.;

Мажидов Кахрамон Халимович – д-р хим. наук, проф.;

Тимухина Елена Николаевна – д-р техн. наук, проф.;

Деев Владислав Борисович – д-р техн. наук, проф.;

Кокшаров Сергей Александрович – д-р техн. наук, проф.

U55 Universum: технические науки : электронный научный журнал. — № 8(149). — Часть 3. — Новосибирск : Изд-во «Юниверсум», 2026. — 80 с. — Текст : электронный. — URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/category/8149> (дата публикации: 28.08.2026).

Содержание

Статьи на русском языке

Промышленность и производство

Химические технологии и химическая промышленность

Синтез и свойства композиционных гидрогелей на основе желатина, окисленного крахмала и акриловой кислоты для водосбережения в условиях засушливого климата 4
Нарзуллаев Бахтиёр Абдуллаевич
Ширинов Шавкат Давлатович

Комплекс Ni(II) на основе тиосемикарбазона 2-ацетил цикlopентанона-1 12
Отамуродова Шахноза Тураевна
Турсунов Мурод Амонович
Умаров Бако Бафаеви
Тулисова Насиба Зайниддиновна

Очистка металлургических промышленных сточных вод сорбентами на основе модифицированного шафирканского бентонита и сапропеля 25
Раззақов Ҳасан Қаландарович
Амонов Мухтар Рахматович
Назаров Сайфулла Ибодуллоевич

Влияние температуры воды при горячем кондиционировании зерна пшеницы сортов «Аср» и «Алексеевич» на органолептические показатели формового хлеба 37
Узоков Юсуф Ахролович
Баракаев Нусратилла Раджабович
Суюнова Нилуфар Исмаиловна

Исследование самопроизвольной полимеризации акриламида в среде этиленгликоля и физико-химических свойств получаемых полиакриламидов 43
Хамракулов Илхомжон Меликузи угли
Файзиев Жахонгир Бахромович
Нуркулов Файзулла Нурмуминович
Ахмедов Ориф Жуманазар угли

Изучение влияния наполнителей на переработку полиуретановых отходов 52
Шодиев Аслиддин Фахриддин угли
Мухиддинов Баходир Фахриддинович
Шокиров Равшан Кахрамонович

Исследование влияния антипирена на основе циануровой кислоты и оксидов алюминия-кремния на реологические свойства, кислородный индекс и огнеустойчивость в композитах на основе полиэтилена F-0220 64
Эсанова Рашида Рахмадович
Тураева Хайита Худайназарович
Тожиева Панжи Жовлиевич
Сафаров Азамат Маматали угли
Равшанова Сожида Сафаровна

Нефтяная и газовая промышленность. Переработка углеводородного сырья

Моделирование и оптимизация параметров солянокислотной обработки геологически неоднородных карбонатных коллекторов 72
Саматов Шерзод Шавкатович
Бойкабилова Махлиё Махмудовна

СТАТЬИ НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ

ПРОМЫШЛЕННОСТЬ И ПРОИЗВОДСТВО

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ХИМИЧЕСКАЯ
ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

Статья поступила в редакцию: 31.07.2026

Статья принята к публикации: 10.08.2026

Статья опубликована: 28.08.2026

УДК 678.6+661.7+631.4

**Синтез и свойства композиционных гидрогелей на основе желатина,
окисленного крахмала и акриловой кислоты для водосбережения в
условиях засушливого климата**

Нарзуллаев Бахтиёр Абдуллаевич
аспирант

Ташкентский научно-исследовательский институт химической технологии
Республика Узбекистан, Ташкентская область, Ташкентский р-н, п/о Шуро-базар
E-mail: baktiyor.narzullayev.97@mail.ru

Ширинов Шавкат Давлатович
д-р техн. наук, PhD

вед. науч. сотр. Ташкентский научно-исследовательский институт химической технологии
Республика Узбекистан, Ташкент

**Synthesis and properties of composite hydrogels based on gelatin, oxidized
starch and acrylic acid for water retention in arid climates**

Narzullayev Bakhtiyor
graduate student of Tashkent Scientific Research Institute of Chemical Technology
Republic of Uzbekistan, Tashkent region, Tashkent district, p / o Shuro Bazaar

Shirinov Shavkat
doctor of Philosophy in Technical Sciences (PhD)
Leading Research Fellow, Tashkent Scientific Research Institute of Chemical Technology
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Библиографическое описание: Нарзуллаев Б.А., Ширинов Ш.Д. Синтез и свойства композиционных гидрогелей на основе желатина, окисленного крахмала и акриловой кислоты для водосбережения в условиях засушливого климата // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 8(149). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23293>

Аннотация

В настоящей работе представлены результаты синтеза и исследования композиционных гидрогелей на основе желатина, окисленного крахмала и акриловой кислоты, предназначенных для эффективного удержания влаги в почве и повышения рациональности использования водных ресурсов в сельском хозяйстве. Целью работы является синтез композиционных гидрогелей на основе желатина, окисленного крахмала и акриловой кислоты и установление влияния содержания акриловой кислоты на их структурные особенности, кинетику набухания и водопоглощающую способность для определения оптимального состава гидрогеля, обладающего высокой влагоудерживающей способностью.

Композитные гидрогели были получены методом свободнорадикальной полимеризации с использованием различных концентраций акриловой кислоты. Структурные особенности синтезированных материалов изучены методом инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье (FTIR), подтвердившим успешное образование трёхмерной полимерной сети и формирование химических связей между компонентами гидрогеля. Исследовано влияние содержания акриловой кислоты на кинетику набухания и водопоглощающую способность материалов. Установлено, что увеличение концентрации акриловой кислоты способствует росту гидрофильности полимерной матрицы и повышению степени набухания до оптимального значения. Наиболее высокие показатели продемонстрировал образец AAJ-4, содержащий 50 % акриловой кислоты, максимальная равновесная водопоглощающая способность которого составила 536 г/г. Показано, что дальнейшее увеличение содержания акриловой кислоты приводит к снижению водопоглощения вследствие увеличения плотности поперечных сшивок. Предложен механизм частичной биоразлагаемости гидрогелей, основанный на гидролитическом разрушении ковалентных сложноэфирных связей и диссоциации ионных поперечных сшивок. Полученные результаты свидетельствуют о том, что разработанный композиционный гидрогель сочетает высокую водоудерживающую способность, интенсивную кинетику набухания и контролируемую частичную биоразлагаемость, что делает его перспективным материалом для применения в условиях дефицита водных ресурсов, повышения влагообеспеченности почв и создания экологически безопасных влагосберегающих технологий в сельском хозяйстве.

Abstract

This paper presents the results of the synthesis and characterization of composite hydrogels based on gelatin, oxidized starch, and acrylic acid. These hydrogels are designed to effectively retain soil moisture and improve water efficiency in agriculture. The aim of this study is to synthesize composite hydrogels based on gelatin, oxidized starch, and acrylic acid and to determine the effect of acrylic acid content on their structural properties, swelling kinetics, and water absorption capacity. This helps determine the optimal hydrogel composition with high water retention capacity.

The composite hydrogels were obtained by free-radical polymerization using various acrylic acid concentrations. The structural properties of the synthesized materials were studied using Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), confirming the successful formation of a three-

dimensional polymer network and the formation of chemical bonds between the hydrogel components. The effect of acrylic acid content on swelling kinetics and water absorption capacity of the materials was also studied. It was found that increasing the acrylic acid concentration promotes increased hydrophilicity of the polymer matrix and increases the swelling ratio to an optimal value. Sample AAJ-4, containing 50 % acrylic acid, demonstrated the highest values, with a maximum equilibrium water absorption capacity of 536 g/g. A further increase in acrylic acid content was shown to decrease water absorption due to an increase in cross-link density. A mechanism for the partial biodegradability of hydrogels based on the hydrolytic destruction of covalent ester bonds and the dissociation of ionic cross-links was proposed. The results indicate that the developed composite hydrogel combines high water-holding capacity, intense swelling kinetics, and controlled partial biodegradability, making it a promising material for use in conditions of water scarcity, for increasing soil moisture availability, and for the development of environmentally friendly, water-saving technologies in agriculture.

Ключевые слова: композиционный гидрогель, желатин, окисленный крахмал, акриловая кислота, набухание, водопоглощение, частичная биоразлагаемость, FTIR, водоудержание, сельское хозяйство.

Keywords: Composite hydrogel, gelatin, oxidized starch, acrylic acid, swelling, water absorption, partial biodegradability, FTIR, water retention, agriculture.

Введение

В условиях изменения климата и опустынивания, когда уменьшение количества осадков и увеличение испарения приводят к значительным потерям воды и резкому снижению продуктивности, по оценкам, к 2050 году около 6 миллиардов человек столкнутся с нехваткой воды. Кроме того, традиционные методы водосбережения, такие как капельное орошение и микроспринклеры, часто характеризуются высокими затратами на внедрение и эксплуатацию [1;8]. В таких условиях биоразлагаемые гидрогели представляют собой перспективную платформу для сельского хозяйства, обеспечивающую эффективное сохранение воды, стабилизацию влажности почвы и контролируемое высвобождение агрохимикатов [3;9].

Однако отмечается, что чрезмерное применение гидрогелей может привести к дефициту кислорода в корневой зоне и застою воды, а также что биополимерные гидрогели обладают недостаточной механической прочностью. В связи с этим подчеркивается необходимость разработки недорогих и прочных композитных материалов для их практического применения [5;7].

Современные обзорные исследования показывают, что гидрогели способны поглощать и удерживать воду в почве, а затем постепенно высвобождать воду и питательные вещества посредством механизма «десвеллинга-диффузии» (deswelling — уменьшение объёма набухшей полимерной сети: в увлажнённой среде гидрогель набухает, а при высыхании среды или поглощении воды растениями вследствие транспирации снижение внутреннего осмотического давления и релаксация полимерной сети вызывают её сжатие и уменьшение объёма). Благодаря этому снижаются потери питательных веществ вследствие вымывания и повышается урожайность сельскохозяйственных культур [7;6].

Плотность эластически активных цепей, приходящихся на единицу объёма полимерной сети, характеризует степень её сшивки, тогда как количество гидрофильных функциональных групп является одним из основных факторов, определяющих водоудерживающую способность гидрогеля. В качестве ключевых требований к идеальному почвенному кондиционеру рекомендуются сверхвысокая водопоглощающая способность, биоразлагаемость и наличие ковалентно-сшитой полимерной сети [2].

Комплексные исследования показывают, что гидрогели способны удерживать удобрения в режиме «фиксация–контролируемое высвобождение», обеспечивая их высвобождение примерно в два раза медленнее по сравнению с внесением в водном растворе. Это способствует снижению вымывания питательных веществ и сокращению выбросов N_2O . Кроме того, насыщенная гидрогелем полимерная сеть стабилизирует структуру почвы и создаёт благоприятные условия для развития корневой системы растений [4;10].

Целью настоящей работы является синтез композиционных гидрогелей на основе желатина, окисленного крахмала и акриловой кислоты, а также исследование влияния содержания акриловой кислоты на их структурные характеристики, кинетику набухания и водопоглощающую способность с целью определения оптимального состава гидрогеля для эффективного удержания влаги в почве и рационального использования водных ресурсов в сельском хозяйстве.

Экспериментальная часть. Композитный гидрогель был синтезирован методом свободнорадикальной полимеризации. На первом этапе был приготовлен раствор акриламида (AAm). Для этого 10,0 г акриламида растворяли в 50 г дистиллированной воды при перемешивании на магнитной мешалке до полного растворения. Затем готовили раствор желатина: 3,0 г желатина добавляли к 15 г дистиллированной воды и перемешивали на магнитной мешалке при комнатной температуре до полного растворения.

На следующем этапе готовили раствор сшивающего агента. Для этого 0,25 г N,N'-метиленабисакриламида (МБА) полностью растворяли в 10 г дистиллированной воды. Одновременно готовили раствор инициатора, растворяя 0,40 г персульфата аммония (APS) в 9 г дистиллированной воды. Поскольку раствор APS является источником свободных радикалов, его готовили непосредственно перед проведением эксперимента для сохранения активности. Для регулирования pH реакционной среды готовили рабочий раствор, растворяя 4,0 г гидроксида натрия (NaOH) в 40 г дистиллированной воды.

Синтезированный гидрогель был всесторонне охарактеризован с использованием современных аналитических методов для изучения его физико-химических свойств, морфологии и водопоглощающей способности.

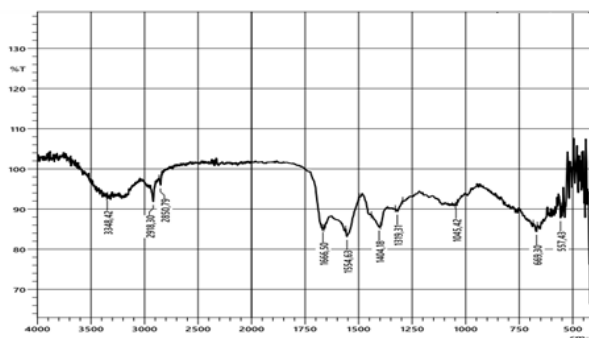


Рисунок 1. ИК-Фурье спектр синтезированного композитного гидрогеля

В ИК-спектре широкий пик поглощения при 3384 см^{-1} указывает на образование прочных водородных связей между гидроксильными и амидными группами. Это свидетельствует о сильных межмолекулярных взаимодействиях между желатином, окисленным крахмалом и полиакриламидом в процессе формирования гидрогелевой сетки. Пики Amide I и Amide II при 1666 см^{-1} и 1555 см^{-1} подтверждают сохранение амидных групп в желатине и полиакриламиде. Характерный пик связи $\text{C}=\text{C}$ ($\sim 1610\text{--}1625\text{ см}^{-1}$), наблюдаемый в свободном мономере акриламида, в спектре не наблюдается. Это указывает на успешное завершение полимеризации акриламида. Сильное поглощение при 1045 см^{-1} соответствует связям $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ и $\text{C}-\text{O}$ крахмала, что подтверждает успешное включение окисленного крахмала в полимерную сетку.

Результаты и их обсуждение. Целью настоящего обзора является систематизация современных подходов к синтезу гидрогелей на основе биополимеров, анализ факторов, влияющих на степень их набухания, а также комплексное рассмотрение основных направлений их применения в сельском хозяйстве. Анализ литературных данных показывает, что гидрогели обладают значительным потенциалом для регулирования влажности почвы и контролируемого высвобождения питательных веществ и агрохимических соединений, что соответствует принципам устойчивого сельского хозяйства. Вместе с тем остаются недостаточно изученными особенности взаимодействия гидрогелей с различными видами растений, влияние условий окружающей среды на их эффективность, отсутствует научный консенсус относительно оптимального выбора типа биополимера, его концентрации и способа применения, а также недостаточно исследованы долгосрочные последствия их использования для почвенной микробиоты и экосистем. Кроме того, большинство существующих исследований выполнено в лабораторных условиях, тогда как внедрение данной технологии в крупномасштабное сельскохозяйственное производство сталкивается с технологическими и логистическими ограничениями и требует дальнейшей оценки её экономической эффективности в реальных условиях эксплуатации.

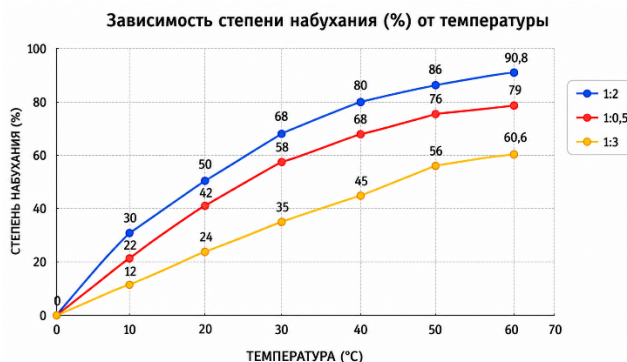


Рисунок 2. Влияние температуры на степень набухания композитных гидрогелей с различным соотношением компонентов

Основная научная новизна данной работы заключается в установлении того, что биоразложение трёхмерной полимерной сети на основе биополимеров протекает преимущественно по двум взаимодополняющим механизмам, сопровождающимся деполимеризацией биополимерных компонентов. Первый механизм основан на гидролитическом разрушении ковалентно-сшитой трёхмерной сети, образованной за счёт связей типа $(-O-CO-)$, соединяющих две или более полимерные цепи. В водной среде под действием кислотного или щелочного катализа происходит нуклеофильная атака, приводящая к гидролизу сложноэфирных связей и разрушению узлов пространственной сети $(-COO-R \rightarrow -COOH + R-OH)$. Второй механизм связан с диссоциацией ионных сшивок (например, $-COO^- \cdots Ca^{2+} \cdots OOC^-$), которая происходит вследствие увеличения ионной силы среды, катионного обмена $(Ca^{2+} \leftrightarrow Na^+/K^+/NH_4^+)$ или протонирования карбоксильных групп при низких значениях pH, что приводит к разрушению физической пространственной структуры гидрогеля.

Акриловая кислота оказывает существенное влияние на процесс биоразложения благодаря наличию ионизируемых карбоксильных групп $(-COOH/-COO^-)$, которые значительно повышают гидрофильность и степень набухания гидрогеля. В результате облегчается диффузия воды внутрь полимерной сети, что способствует ускорению процессов биоразложения. В предлагаемом гидрогеле деградация преимущественно обусловлена разрушением биополимерных фрагментов и гидролизующимися полимерными связями, тогда как полимерная цепь, сформированная акриловой кислотой, характеризуется значительно более высокой устойчивостью к разложению и деградирует существенно медленнее. В связи с этим разработанная система может быть отнесена к классу частично биоразлагаемых гидрогелей.

Таблица 1.

Кинетические параметры водопоглощения гидрогеля AAJ-4 в зависимости от времени

№	Время (часы)	Q/Q_e (%)	Водопоглощение, Q (г/г)	Средняя скорость всасывания (г/г·час)
1	0	0.0	0.0	—
2	3	$\approx 30.4^*$	163.0	54.33
3	6	60.8	325.9	54.33
4	12	82.3	441.1	19.20
5	18	93.7	502.2	10.18

В таблице 1 представлена кинетика водопоглощения гидрогеля ААЖ-4 в зависимости от времени. Наиболее интенсивное водопоглощение наблюдается на начальной стадии набухания (0–6 ч) со средней скоростью 54,33 г/(г·ч/ч). Эта стадия связана с высокой концентрацией свободных гидрофильных функциональных групп и значительным градиентом концентрации между полимерной матрицей и водной средой. По мере насыщения гидрогеля скорость водопоглощения постепенно снижается до 19,20 г/(г·ч/ч) через 12 ч и до 10,18 г/(г·ч/ч) через 18 ч, что связано с уменьшением свободного объема полимерной сетки и достижением состояния набухания, близкого к равновесному. Через 18 ч гидрогель достигает 93,7 % от равновесной водопоглощающей способности (502,2 г/г), что указывает на высокую эффективность удержания воды и быстрое формирование стабильной трехмерной гидрофильной структуры.

В заключение В настоящей работе методом свободнорадикальной полимеризации были успешно синтезированы частично биоразлагаемые композиционные гидрогели на основе желатина, окисленного крахмала и акриловой кислоты. Результаты ИК-Фурье-спектроскопии подтвердили формирование трёхмерной полимерной сети за счёт образования поперечных сшивок между компонентами гидрогеля.

Установлено, что содержание акриловой кислоты оказывает существенное влияние на кинетику набухания и водопоглощающую способность гидрогелей. С увеличением концентрации акриловой кислоты возрастает гидрофильность полимерной сети благодаря наличию ионизируемых карбоксильных групп, что способствует ускорению диффузии воды и повышению степени набухания. Среди исследованных образцов наилучшие показатели продемонстрировал гидрогель ААЖ-4, содержащий 50 % акриловой кислоты, который достиг максимальной равновесной водопоглощающей способности 536 г/г. При этом через 6 часов степень водопоглощения составила 60,8 %, а через 18 часов достигла 93,7 % от равновесного значения. Дальнейшее увеличение содержания акриловой кислоты до 60 % сопровождалось снижением водопоглощения вследствие повышения плотности сшивки полимерной сети и уменьшения её подвижности.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что разработанный композиционный гидрогель ААЖ-4 сочетает высокую вододерживающую способность, интенсивную кинетику набухания и контролируемую частичную биоразлагаемость. Благодаря этим свойствам материал представляет значительный практический интерес в качестве влагосберегающего и экологически безопасного суперабсорбента для сельского хозяйства, особенно в условиях дефицита водных ресурсов и засушливого климата.

Список литературы

1. Ahmed, E.M. Hydrogel: Preparation, characterization, and applications: A review / E.M. Ahmed // Journal of Advanced Research. – 2015. – Т. 6, № 2. – Р. 105–121.
2. Guilherme, M.R. Superabsorbent hydrogels based on polysaccharides for agricultural and environmental applications / M.R. Guilherme, F.A. Aouada, A.R. Fajardo [et al.] // European Polymer Journal. – 2021. – Т. 150.

3. Ismail, H. Starch-based hydrogels: Present status and applications / H. Ismail, M. Irani, Z. Ahmad // International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials. – 2021. – Т. 70, № 10. – P. 709–725.
4. Kabiri, K. Superabsorbent hydrogel composites and nanocomposites: A review / K. Kabiri, H. Omidian, M.J. Zohuriaan-Mehr, S. Doroudiani // Polymer Composites. – 2020. – Т. 41, № 2. – P. 373–398.
5. Li, X. Biopolymer-based hydrogels for water retention and controlled release in agricultural applications / X. Li, Y. Zhao, H. Chen [et al.] // International Journal of Biological Macromolecules. – 2023. – Т. 236.
6. Montesano, F.F. Biodegradable superabsorbent hydrogels for agricultural applications: A review / F.F. Montesano, A. Parente, P. Santamaria [et al.] // Agronomy. – 2022. – Т. 12.
7. Rosiak, J.M. Hydrogels and their medical and agricultural applications / J.M. Rosiak, F. Yoshii // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B. – 2019. – Т. 236. – P. 370–375.
8. Thakur, V.K. Processing and characterization of natural cellulose fibers/thermoset polymer composites / V.K. Thakur, M.K. Thakur // Carbohydrate Polymers. – 2021. – Т. 257.
9. Wang, W. Recent advances in biodegradable superabsorbent hydrogels for sustainable agriculture / W. Wang, Y. Zhang, J. Liu [et al.] // Carbohydrate Polymers. – 2023. – Т. 301.
10. Zhang, H. Preparation and characterization of biodegradable gelatin-based hydrogels with enhanced swelling properties / H. Zhang, X. Wang, Y. Liu [et al.] // Journal of Applied Polymer Science. – 2022. – Т. 139.

Статья поступила в редакцию: 02.08.2026

Статья принята к публикации: 07.08.2026

Статья опубликована: 28.08.2026

УДК 544.14+546.73

Комплекс Ni(II) на основе тиосемикарбазона 2-ацетил циклопентанона-1

Отамуродова Шахноза Тураевна

базовый докторант

Бухарский государственный университет

Республика Узбекистан, г. Бухара

E-mail: otamurodova086@gmail.com

Турсунов Мурод Амонович

проф.

Бухарский государственный университет

Республика Узбекистан, г. Бухара

E-mail: tursunovma@mail.ru

Умаров Бако Бафаевич

проф.

Бухарский государственный университет

Республика Узбекистан, г. Бухара

E-mail: umarovbb@mail.ru

Тулисова Насиба Зайниддиновна

исследователь, Бухарский государственный университет

Республика Узбекистан, г. Бухара

E-mail: to'lisovanz@mail.ru

Ni(II)-complex 2-(1-(2-acetyl-cyclopent-1-enyl) ethylidene)thiosemicarbazone

Otamurodova Shahnoza Turaevna

PhD student

Bukhara State University

Republic of Uzbekistan, Bukhara

Tursunov Murod Amonovich

professor

Bukhara State University

Republic of Uzbekistan, Bukhara

Umarov Bako Bafaevich

professor

Bukhara State University

Republic of Uzbekistan, Bukhara

Tulisova Nasiba Zayniddinovna

Researcher

Bukhara State University

Republic of Uzbekistan, Bukhara

Библиографическое описание: Комплекс Ni(II) на основе тиосемикарбазона 2-ацетил циклопентанона-1 // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Отамуродова Ш.Т. [и др.]. 2026. 8(149). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23286>

Аннотация

В данной работе представлены результаты синтеза, строение, спектральная характеристика, рентгеноструктурный анализ и исследование поверхности Хиршфельда комплексного соединения комплекс Ni(II) на основе тиосемикарбозона 2-ацетилциклопентано-1 (H_2L). H_2L и ацетат никеля(II) взаимодействовали в аммиачно-водной среде в молярном соотношении 1:1. Физико-химические свойства полученного соединения изучены методами УФ-, ИК-, 1H - и ^{13}C -ЯМР-спектроскопии, а также рентгеноструктурным анализом. Рентгеноструктурный анализ комплекса тиосемикарбозона 2-ацетилциклопентано-1 с Ni(II) подтвердил, что центральный ион обладает плоско-квадратной геометрией. В ИК-спектре H_2L наблюдаются характерные колебательные полосы $\nu(Ni-O)$, $\nu(Ni-N)$ и $\nu(Ni-S)$, что подтверждает координацию лиганда с металлом. Данные 1H и ^{13}C ЯМР также свидетельствуют о формировании комплекса. По результатам рентгеноструктурного анализа установлено, что комплекс кристаллизуется в моноклинной сингонии и принадлежит к пространственной группе C_2 . В кристаллической структуре ион Ni(II) находится в деформированном плоско-квадратном координационном окружении. Поверхность Хиршфельда и двумерные отпечатки-fingerprint показывают, что при стабилизации кристаллической ячейки основную роль играют межмолекулярные взаимодействия типов $H\cdots H$, $O\cdots H/H\cdots O$ и $S\cdots H/H\cdots S$. Полученные результаты полностью подтверждают строение и координационные особенности синтезированного комплекса.

Abstract

This work presents the synthesis, structural characterization, spectral studies, single-crystal X-ray diffraction analysis, and Hirshfeld surface investigation of a Ni(II) complex with thiosemicarbazone of 2-acetylcyclopentanone-1 (H_2L). The ligand H_2L and nickel(II) acetate were reacted in an ammonia–aqueous medium at a 1:1 molar ratio. The physicochemical properties of the obtained compound were investigated by UV–Vis, IR, 1H NMR, and ^{13}C NMR spectroscopy, as well as by single-crystal X-ray diffraction analysis.

The X-ray crystal structure of the Ni(II) complex of thiosemicarbazone of 2-acetylcyclopentanone-1 confirmed that the central metal ion adopts a square-planar geometry. The IR spectrum exhibits characteristic vibrational bands assigned to $\nu_{(Ni-O)}$, $\nu_{(Ni-N)}$ and $\nu_{(Ni-S)}$, confirming the coordination of the ligand to the metal center. The 1H and ^{13}C NMR data also support the formation of the complex.

According to the X-ray diffraction results, the complex crystallizes in the monoclinic crystal system and belongs to the space group C_2 . In the crystal structure, the Ni(II) ion is located in a distorted square-planar coordination environment. Hirshfeld surface analysis and two-dimensional fingerprint plots reveal that intermolecular $H\cdots H$, $O\cdots H/H\cdots O$, and $S\cdots H/H\cdots S$ interactions play a dominant role in stabilizing the crystal packing. The obtained results fully confirm the structure and coordination features of the synthesized complex.

Ключевые слова: колебательные частоты, интенсивное поглощение, азометин, таутомерия, диапазон, делокализация, анализ поверхности Хиршфельда.

Keywords: vibrational frequencies, intense absorption, azomethine, tautomerism, spectral region, delocalization, Hirshfeld surface analysis.

Введение

Тиосемикарбазоны и их комплексные соединения с металлами вызывают большой интерес в каталитической и биологической химии, поскольку их электронная структура и координационные свойства непосредственно определяют физико-химические характеристики комплексов. В частности, взаимодействие тиосемикарбазонных лигандов, производных 2-ацетилциклопентанона, с ионами Ni(II) даёт как структурно, так и функционально интересные соединения. Хотя предыдущие исследования подтвердили способность таких лигандов образовывать комплексы, количественный анализ их кристаллографической структуры и межмолекулярных взаимодействий по-прежнему изучен недостаточно.

Целью данной работы: тиосемикарбазон 2-ацетилциклопентанона-1 (H_2L) в соотношении 1:1 с ионом Ni(II) является получение комплекса и установление его строения и спектральных свойств. Для этого поставлены следующие основные задачи: (I) синтез комплекса и его характеристика физико-химическими методами; (II) определение рентгеноструктуры комплекса и подтверждение координационной геометрии иона Ni(II);

(III) количественная оценка вкладов межмолекулярных взаимодействий, стабилизирующих кристаллическую решётку, с помощью анализа поверхности Хиршфельда и 2D-диаграмм отпечатков;

(IV) сопоставление полученных результатов с спектральными данными (UV, ИК, 1H и ^{13}C ЯМР) и обсуждение координационных особенностей комплекса.

Материалы и методы

Для систематического изучения состава, пространственного строения и физико-химических свойств синтезированных комплексных соединений были применены комплексные физико-химические методы анализа. Так, ИК-спектры регистрировались на спектрометре IRTracer-100 (Shimadzu, Япония) в диапазоне $4000-500\text{ см}^{-1}$ (чувствительность сигнал/шум — 60.0:1) и на ATR-Фурье-спектрометре «ATR-Furue-Inventio-S» (Bruker, Германия) в диапазоне $4000-400\text{ см}^{-1}$ с полным внутренним отражением (ATR).

Для спектрофотометрических исследований использовались спектрометры UV-1280 и UV-1900i (Shimadzu, Япония), а также фотометр V-5100 (Китай).

ЯМР (1H и ^{13}C): 1H - и ^{13}C -спектры регистрировались на спектрометре Bruker AVANCE III 400 MHz ($^1H = 400\text{ MHz}$; $^{13}C = 100\text{ MHz}$) в растворе $CDCl_3$ с внутренним стандартом TMS. Обработка спектров выполнялась в программе MestReNova.

Рентгеноструктурный анализ (RCA): данные по одиночным кристаллам собирались на дифрактометре Bruker D8 Venture (или эквивалентном инструменте) с использованием $Mo\ K\alpha$ -излучения ($\lambda = 0.71073\text{ Å}$) при $T = 295(2)\text{ K}$. Структура была решена программой SHELXT и уточнена методом наименьших квадратов в SHELXL-2019/1; визуализация и подготовка иллюстраций выполнялись в интерфейсе Olex2.

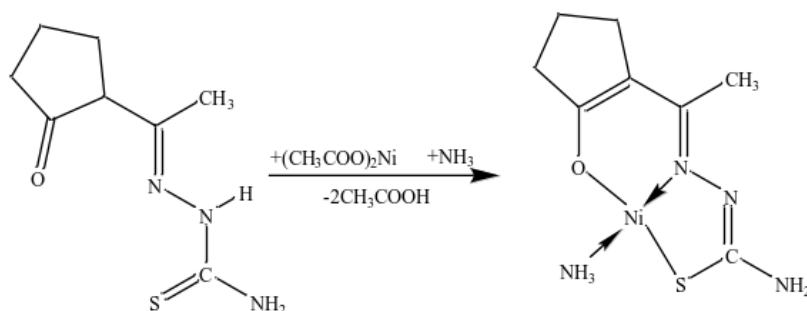
Анализ поверхности Хиршфельда и 2D-диаграммы fingerprint были построены на основе .cif-файла с использованием CrystalExplorer21 (Version 21.5, University of Western Australia; Turner et al.).

Температура плавления комплекса определялась на аппарате WWR MELTING-POINT APPARATUS.

Результаты и их обсуждение Тиосемикарбазоны представляют собой важный класс лигандов, содержащих донорные атомы азота и серы, и вызывают широкий интерес благодаря своему структурному разнообразию и многогранным донорным свойствам. Полезные биологические эффекты тиосемикарбазонов (например, противоопухолевая, антибактериальная, противовирусная и противопаразитарная активность) делают исследование их химических свойств ещё более привлекательным. Координационные свойства тиосемикарбазонов играют важную роль в повышении их биологической активности. После депротонирования лиганды оснований Шиффа переходят из енольной формы в таутомерное состояние, благоприятное для координации. В результате они образуют устойчивые комплексы, связываясь с ионом металла через депротонированные донорные атомы кислорода, азота и серы.

При взаимодействии тиосемикарбазона 2-ацетилциклопентона-1 с ионом Ni(II) в молярном соотношении 1:1 лиганд ведёт себя как тридентатный, занимая три координационных места, а четвертое координационное положение занимает молекула аммиака (1-схема). Комплекс $NiL \cdot NH_3$ синтезирован следующим образом: к раствору 1,99 г (0,01 моль) H2L в 20 мл этаноле при нагревании и постоянном перемешивании прибывали по каплям водно-аммиачного раствора 2,49 г (0,01 моль) ацетата никеля(II). В 10 ходе реакции через 3–5 минут наблюдалось, комплексообразовались с изменением окраски до тёмно-красного цвета. Через сутки на дне колбы выпали игольчатые кристаллы темно-красного цвета[7].

Полученный комплекс состава $[Ni(C_8H_{11}N_3OS) \cdot NH_3]$ выделяли фильтрованием. Осадок несколько раз промывали этанолом. Продукт сушили в вакуум-эксикаторе над P_2O_5 до постоянной массы. Выход: 84,2 % (2,3 г). Температура плавления комплекса составляет 271–273 °C.



1-схема

В ИК-спектре комплекса $[Ni(C_8H_{11}N_3OS) \cdot NH_3]$ в области 3494–3172 cm^{-1} зарегистрированы валентные колебания N–H молекулы аммиака, что указывает на наличие молекулы NH_3 в координационной сфере. Колебания в областях 2978 и 2897 cm^{-1} соответствуют валентным колебаниям алифатических $\nu(C-H)$. Интенсивные полосы $\nu(C=N)$

в диапазоне (как показано на рисунке-1) $1589\text{--}1533\text{ см}^{-1}$ относятся к азометиновому фрагменту; сдвиг этих полос в сторону более низких частот по сравнению с спектром лиганда подтверждает координацию атома азота азометина с ионом Ni(II) [16]. Колебания в интервале $1443\text{--}1336\text{ см}^{-1}$ в основном соответствуют валентным колебаниям $\nu(\text{C}=\text{N})$, деформационные колебания $\delta(\text{C}=\text{N})$ наблюдаются в области $852\text{--}704\text{ см}^{-1}$.

В диапазоне частот $1262\text{--}1008\text{ см}^{-1}$ зарегистрированы колебания, относящиеся к $\nu(\text{C}=\text{N})$, $\nu(\text{C}=\text{O})$ и колебаниям конъюгированных фрагментов молекулы лиганда. Деформационные колебания видны в области $852\text{--}704\text{ см}^{-1}$. Низкочастотные полосы в области $569\text{--}439\text{ см}^{-1}$ дополнительно подтверждают образование координационных связей $\nu(\text{Ni}=\text{N})$ и $\nu(\text{Ni}=\text{S})$. Полученные данные ИК-спектральных исследований свидетельствуют о том, что лиганд координируется тридентатно к иону Ni(II) через атомы O, N и S [8].

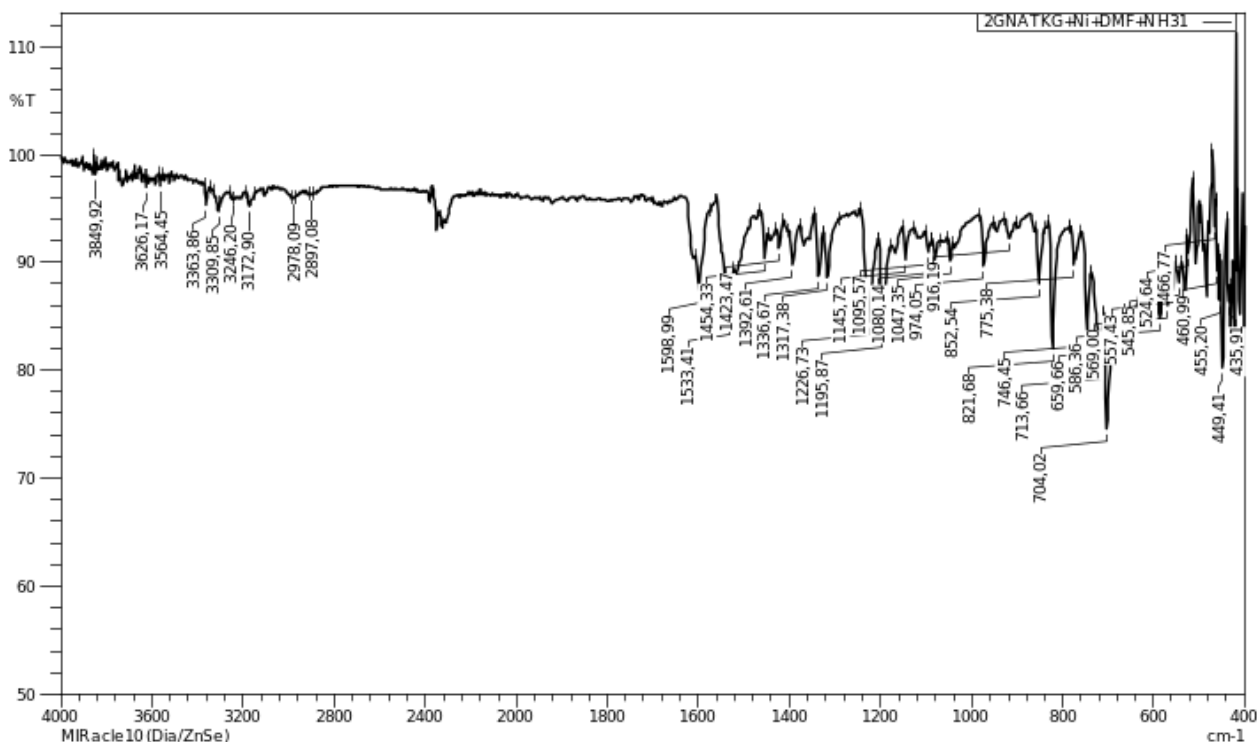


Рисунок 1. ИК-спектр комплекса $[\text{NiL} \cdot \text{NH}_3]$

В электронного спектра поглощения комплекса тиосемикарбозона 2-ацетилциклопентонона-1 с Ni(II) наблюдаются интенсивные полосы в интервале $240\text{--}275\text{ нм}$. Основной максимум поглощения проявляется при $\lambda_{\text{max}} = 263,5\text{ нм}$; тачичие этого сигнала объясняется $\pi \rightarrow \pi$ и $n \rightarrow \pi$ переходами, котори характерны для азометинового и тиосемикарбазонного фрагментов лиганда. В результате образования комплекса енольные атом кислорода, азота азометина, о также серн тиоамида лиганда образуют координатсионные связей с ионом Ni(II) . Это приводит к перераспределению электронной плотности в лиганде и, как следствие, к формированию полос поглощения, наблюдаемых в УФ-спектре. Полосы в диапазоне $240\text{--}245\text{ нм}$ в основном соответствуют $\pi \rightarrow \pi$ переходам лиганда, тогда как поглощения в области $260\text{--}270\text{ нм}$ связаны с $n \rightarrow \pi$ переходами, в которых участвуют неподелённые электронные пары азометина и тиосемикарбазона. Постепенное убывание поглощения при длинах волн $>300\text{ нм}$ указывает на отсутствие в этом диапазоне интенсивных электронных переходов. Поскольку d-d переходы, характерные для иона Ni(II) ,

обычно наблюдаются в видимой области, в спектре, записанном в диапазоне 200–400 нм, выделенных линий d–d не обнаружено. Полученные данные УФ-спектроскопии подтверждают координацию лиганда к Ni(II) через донорные атомы O, N и S (см. рис. 2).

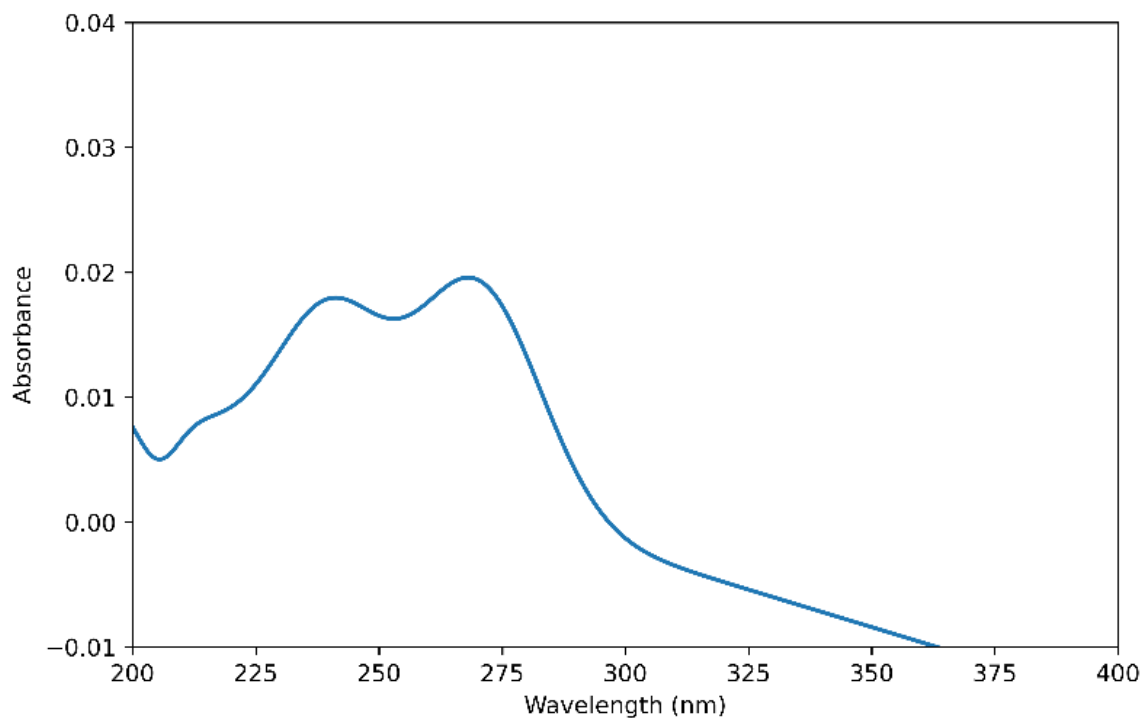


Рисунок 2. УФ-спектр комплекса $NiL \cdot NH_3$

В 1H -ПМР-спектре комплекса $NiL \cdot NH_3$ при $\delta = 3.81$ ppm наблюдается синглет, который приписывается протонам координированной молекулы аммиака. Протоны цикlopентанового фрагмента и метильной группы выделяются в области $\delta = 2.10$ ppm; при этом синглет, соответствующий метильной группе, связанной с азометиновым углеродом, проявляется в этой же области [5]. Небольшое смещение сигналов протонов азометина и NH в область низкого поля подтверждает координацию азотного атома азометина и серы тиоида с ионом Ni(II) [13].

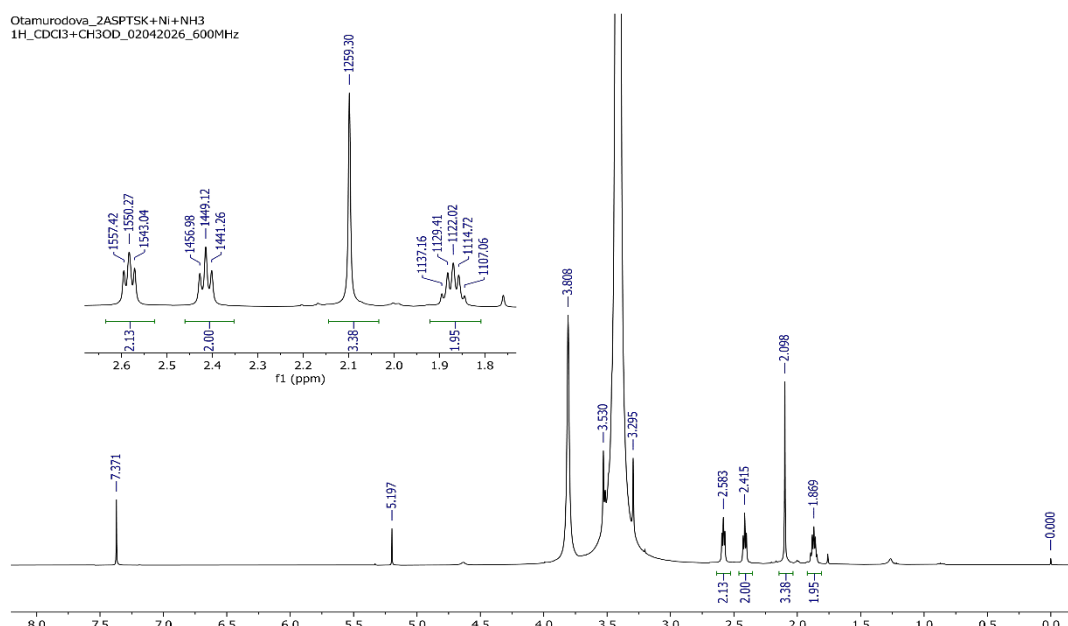


Рисунок 3. 1H - ПМР-спектр комплекса $NiL \cdot NH_3$ в растворе в хлороформе ($CDCl_3$)

В ^{13}C -ЯМР-спектре сильные интенсивные сигналы при $\delta = 192.95$ и 192.98 ppm соответствуют углеродам карбонильной группы, что указывает на сохранность цикlopентанового фрагмента лиганда. Сигнал при $\delta = 165.10$ ppm относится к углероду азометиновой группы ($\text{C}=\text{N}$). Мультиплетные сигналы в интервале $\delta \approx 139\text{--}111.4$ ppm соответствуют sp^2 -гибридизированным углеродам в кольце цикlopентанона. Разнообразие химических сдвигов объясняется делокализацией π -электронов и сопряжённой системой молекулы [3,17]. Резонансы при $\delta = 129.6$; 129.2 ; 127.9 ; 119.4 и 118.7 ppm соответствуют олефинным ($\text{C}=\text{C}$) углеродам (см. рис. 3).

Кроме того, сигнал при $\delta = 96,4$ ppm указывает на наличие углеродного атома, близкого по характеру к енольной форме. Триплет при $\delta = 77,2$ ppm соответствует дополнительному сигналу растворителя ($\text{DMSO-d}_6/\text{CDCl}_3$). Полученные данные ^{13}C - и ^1H -ЯМР, ИК-спектроскопии и рентгеноструктурного анализа (РСА) согласуются между собой и подтверждают тиосемикарбазоновую природу синтезированного координационного комплекса (см. рис. 4).

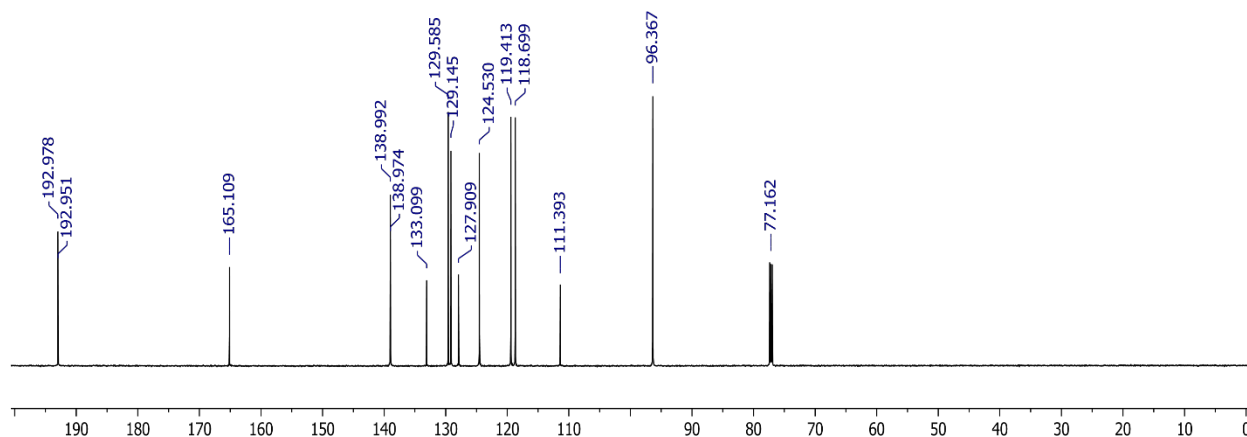


Рисунок 4. ^{13}C -ЯМР-спектр комплекса $\text{NiL}\cdot\text{NH}_3$

По результатам рентгеноструктурного анализа установлено, что синтезированный комплекс Ni(II) кристаллизуется в моноклинной сингонии и принадлежит к пространственной группе C_2 [2]. Молекулярная формула комплекса выражается как $[\text{Ni}(\text{C}_8\text{H}_{11}\text{N}_3\text{OS})\cdot\text{NH}_3]$. Параметры элементарной ячейки: $a = 19.0822(13)$ Å, $b = 7.0559(5)$ Å, $c = 9.5113(7)$ Å, $\beta = 115.302(3)^\circ$; объем $V = 1157.77(14)$ Å³. Число формульных единиц в элементарной ячейке $Z = 4$. Длины связей (Å) приведены в табл. 1 и составляют: $\text{Ni}(1)\text{--S}(1) = 2.1411(8)$, $\text{Ni}(1)\text{--O}(1) = 1.8572(18)$, $\text{Ni}(1)\text{--N}(8) = 1.879(2)$, $\text{Ni}(1)\text{--N}(12) = 1.931(3)$, $\text{S}(1)\text{--C}(10) = 1.733(3)$, $\text{O}(1)\text{--C}(1) = 1.311(3)$, $\text{C}(1)\text{--C}(2) = 1.358(4)$, $\text{C}(1)\text{--C}(5) = 1.502(4)$, $\text{C}(2)\text{--C}(3) = 1.511(3)$, $\text{C}(2)\text{--C}(6) = 1.424(3)$, $\text{C}(3)\text{--C}(4) = 1.548(4)$, $\text{C}(4)\text{--C}(5) = 1.527$, $\text{C}(6)\text{--C}(7) = 1.495$, $\text{C}(6)\text{--N}(8) = 1.327(3)$, $\text{N}(8)\text{--N}(9) = 1.411(3)$, $\text{N}(9)\text{--C}(10) = 1.299(4)$, $\text{C}(10)\text{--N}(11) = 1.362(3)$. (1-Таблица) При сравнении полученных результатов с координацией иона Ni(II) в комплексе с другим тиосемикарбазонным лигандом, где длины связей с центральным атомом составляют $\text{Ni}(1)\text{--S}(1) 2.3899$ Å, $\text{Ni}(1)\text{--N}(1) 2.101$ Å, $\text{Ni}(1)\text{--N}(2) 2.028$ Å и $\text{Ni}(1)\text{--N}(6) 2.021$ Å [2] (DOI: 10.1016/j.molstruc.2021.130362), в кристалле комплекса 2-ацетилциклопентанон тиосемикарбазона с Ni(II) наблюдается связь $\text{Ni}(1)\text{--O}(1)$ длиной 1.8572 Å (отличие заключается в том, что вместо шестого координированного к Ni атома азота связан атом кислорода). В соответствии с этим, хотя значения длин связей с центральным атомом

в никелевом комплексе 2-ацетилциклопентанон тиосемикарбазона отличаются некоторой укороченностью, различие длин связей в окружении центрального иона подтверждает деформированную плоско-квадратную геометрию (рис. 5).

Полученные кристаллографические параметры чётко характеризуют монокристалл комплекса и подтверждают координацию лиганда к иону Ni(II) через донорные атомы O, N и S. Структура была уточнена методом наименьших квадратов с использованием программы SHELXL-2019/1.

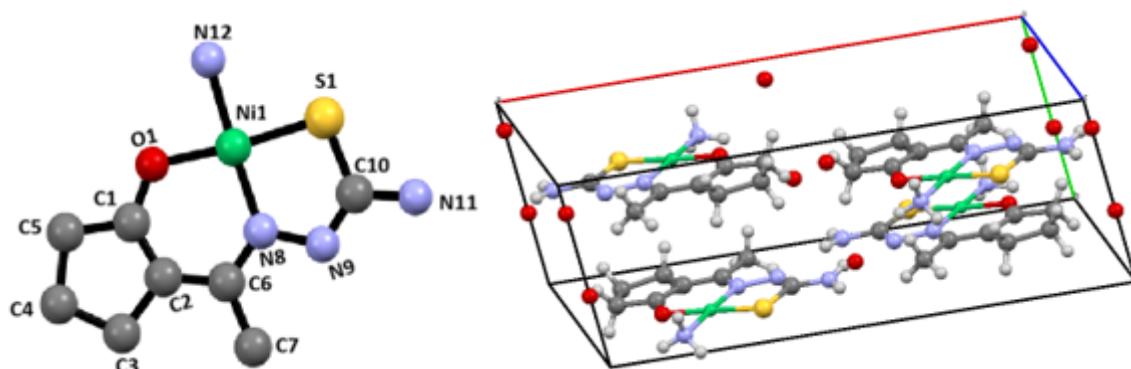


Рисунок 5. Молекулярная структура комплекса $NiL \cdot NH_3$ — (a); расположение молекул комплекса в элементарной ячейке — (b)

Таблица 1.

Длины связей (Å) в комплексе $NiL \cdot NH_3$

Atom	Atom	Length/Å	Atom	Atom	Length/Å
Ni1	S1	2.1411(8)	C2	C6	1.424(3)
Ni1	O1	1.8572(18)	C3	C4	1.548(4)
Ni1	N8	1.879(2)	C4	C5	1.527(4)
Ni1	N12	1.931(3)	C6	C7	1.495(3)
S1	C10	1.733(3)	C6	N8	1.327(3)
O1	C1	1.311(3)	N8	N9	1.411(3)
C1	C2	1.358(4)	N9	C10	1.299(4)
C1	C5	1.502(4)	C10	N11	1.362(3)
C2	C3	1.511(3)			

Таблица 2.

Углы связей (°) в комплексе $NiL \cdot NH_3$

Atom	Atom	Atom	Angle/°	Atom	Atom	Atom	Angle/°
O1	Ni1	S1	174.62(7)	C2	C3	C4	104.8(2)
O1	Ni1	N8	97.76(8)	C5	C4	C3	107.3(2)
O1	Ni1	N12	84.66(10)	C1	C5	C4	104.2(2)
N8	Ni1	S1	87.61(6)	C2	C6	C7	117.8(2)
N8	Ni1	N12	177.50(18)	N8	C6	C2	121.5(2)
N12	Ni1	S1	89.96(8)	N8	C6	C7	120.7(2)
C10	S1	Ni1	96.30(9)	C6	N8	Ni1	125.15(17)
C1	O1	Ni1	122.17(18)	C6	N8	N9	114.4(2)
O1	C1	C2	127.6(3)	N9	N8	Ni1	120.44(16)

Atom	Atom	Atom	Angle/°	Atom	Atom	Atom	Angle/°
O1	C1	C5	119.0(2)	C10	N9	N8	112.8(2)
C2	C1	C5	113.2(2)	N9	C10	S1	122.7(2)
C1	C2	C3	110.4(2)	N9	C10	N11	121.0(3)
C1	C2	C6	125.6(2)	N11	C10	S1	116.1(2)
C6	C2	C3	123.9(2)				

Центральный ион Ni(II) в комплексе координируется через атом азота азометиновой группы, атом кислорода карбонильного фрагмента и атом серы тиоамида. Кроме того, молекула аммиака также координирует металл, завершая общее координационное окружение. При координации лиганда формируется пятиядерное металлическое кольцо [18]. В процессе координации перераспределяется электронная плотность в связи C=N азометиновой группы и в связи C=S тиоамидного фрагмента. Это согласуется с данными ИК- и ЯМР-спектров [6]. Конформация лиганда при координации частично сохраняет плоско-квадратный характер и сопряжённую π -электронную систему. Для более глубокого понимания упаковки в кристалле и количественной оценки вкладов различных межмолекулярных взаимодействий в стабильность структуры были использованы геометрические параметры, полученные методом РТТ, для построения и анализа поверхностей Хиршфельда. Анализ поверхности Хиршфельда позволяет выявить природу внутримолекулярных и межмолекулярных водородных взаимодействий в кристаллической структуре комплекса. По результатам «отпечатков-fingerprint» наибольший вклад в ячейку вносит контакт $H\cdots H$ (35,7 %), что указывает на значимую роль взаимодействий Ван-дер-Ваальса в стабилизации кристаллической структуры (рис.6). Контакты $O\cdots H/H\cdots O$ составляют 18,2 % и играют заметную роль, подтверждая важность водородных связей в кристаллической решётке. Доли $O\cdots O/O\cdots O$ и $H\cdots O/O\cdots H$ составляют 12,2 % и 7,7 % соответственно [15]. Кроме того, контакты $S\cdots H/H\cdots S$ демонстрируют вклад в размере 5,8 % и 4,4 %, что указывает на активное участие тиосемикарбазонного фрагмента во внутримолекулярных взаимодействиях. Контакты $H\cdots N/N\cdots H$ равны 5,1 % и 1,5 %. Контакты $C\cdots H/H\cdots C$ дают вклад 4,2 % и 3,2 % соответственно, оказывая дополнительное стабилизирующее влияние на элементарную ячейку. Доля контактов $C\cdots C/C\cdots C$ составляет 1,4 %, что свидетельствует о слабой, но имеющейся роли $\pi\cdots\pi$ взаимодействий. В целом анализ поверхности Хиршфельда подтверждает результаты РТТ: кристаллическая структура комплекса стабилизируется водородными связями и слабыми дисперсионными силами (Ван-дер-Ваальса)

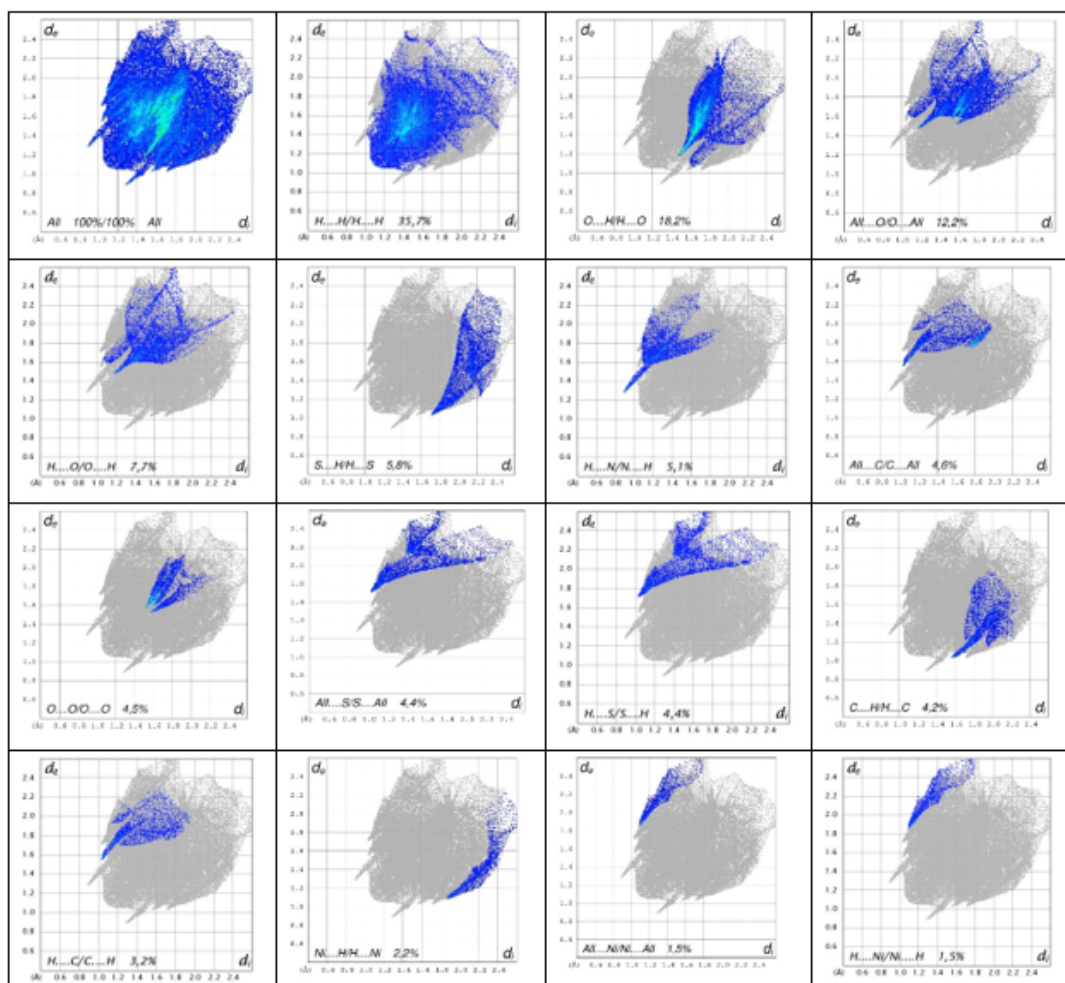


Рисунок 6. Двухмерные диаграммы отпечатков-fingerprint комплекса $NiL \cdot NH_3$ и относительные характеристики поверхности Хиршфельда

Заключение

Синтезирован комплекс тиосемикарбозона 2-ацетилциклопентонона-1 с $Ni(II)$. Спектроскопические исследования показали координацию лиганда к иону $Ni(II)$ через атом серы. Ион $Ni(II)$ обладает преимущественно деформированной плоско-квадратной геометрией. Анализ по методу Хиршфельда показал, что кристаллическая решётка в основном стабилизируется водородными связями и Ван-дер-Ваальсовыми взаимодействиями. Полученные результаты представляют собой научную основу для дальнейших исследований и изучения свойств комплексов. Панова Е.В., Турсунов М.А., Отамуродова Ш.Т., Сафин Д.А. синтезировали пиразолино-тиоамидный гибрид, охарактеризовали его кристаллическую структуру, электронные свойства, а также продемонстрировали потенциал его связывания с гемоглобином S, что указывает на перспективность использования лигандов данного типа для биологического таргетинга. В связи с этим, благодаря аналогичным координационным и электронным характеристикам, комплекс $Ni(II)$ также заслуживает дальнейшего тестирования в рамках биологических испытаний, а сопоставление наших экспериментальных данных подтверждает научную обоснованность проведения последующих биологических и электрокаталитических исследований этих комплексов. Полученные результаты служат научной основой для дальнейших изысканий и детального изучения свойств комплексных соединений.

Список литературы

1. Авезов Қ.Ғ. [Synthesis, structures and properties of Ni(II) and Cu(II) complexes based on fluorinated β -diketone derivatives]. (In Uzb) PhD dissertatsiya.- O'zMU.- 120 b. – 2018.
2. Рафаэль, П.Ф. и др. Комплексы никеля (II) с N(4) замещёнными тиосемикарбазами, полученными из пиридин-2-карбальдегида: кристаллические структуры, спектральные аспекты и анализ поверхности Хиршфельда / П.Ф. Рафаэль [и др.] // Журнал молекулярной структуры = Journal of Molecular Structure. – 2021. – Т. 1237.
3. Севинчова, Д.Н. Study of Ni(II) complexes with aroylhydrazones of the ethyl ester of 5,5-dimethyl-2,4-dioxohexanoic acid / Д.Н. Севинчова, М.А. Турсунов, Б.Б. Умаров // Развитие науки и технологий. – 2022. – № 1. – С. 29–33.
4. Турсунов М.А., Умаров Б.Б., Авезов К.Г. // Журнал структурной химии. – 2021. – Т. 62, № 3. – С. 394–403.
5. Турсунов, М.А. Synthesis and crystal structures of nickel(II) complexes with derivatives of benzoylacetalddehydes / М.А. Турсунов, Б.Б. Умаров, Қ. Ғ. Авезов // Название журнала. – 2023. – Т. 15, № 3. – Р. 45–58.
6. Турсунов, М.А. Structure and tautomerism in a series of aroylhydrazones of benzoylacetalddehyde / М.А. Турсунов, Б.Б. Умаров, М.М. Амонов, Г.К. Холиқова, Г.Г. Садуллаева; пер. с рус // Развитие науки и технологий. – 2020. – № 4. – С. 59–64.
7. Турсунов, М.А. Synthesis and crystal structure of nickel(II) and zinc(II) complexes with benzoylacetalddehyde derivatives / М.А. Турсунов, Б.Б. Умаров, К.Г. Авезов; на рус. яз // Вестник Московского университета. Серия 2, Химия. – 2019. – Т. 74, № 3. – С. 138–142.
8. Турсунов, М.А. Synthesis and crystal structure of the nickel(II) complex with aroyl hydrazone of ethyl ether of 5,5-dimethyl-2,4-dioxohexane acid / М.А. Турсунов, Б.Б. Умаров, М.Я. Эргашов, К.Г. Авезов; на рус. яз // Журнал структурной химии. – 2020. – Т. 61, № 1. – С. 73–85.
9. Otamurodova, Sh. T. 2 gidroksi 1 naftaldegid hosilalari sintezi, tuzilishi va xossalari / Sh. T. Otamurodova, M.A. Tursunov; на узб. яз // Development of Science. – 2010. – Т. 2. – Р. 266–270.
10. Otamurodova, Sh. T. Structure and properties of synthesis of benzoyl hydrazones of monocarbonyl compounds / Sh. T. Otamurodova, M.A. Tursunov, B. Sh. Ganiev; на англ. яз // «Noqulay iqlim sharoitida zamonaviy agrotexnologiyalar qo'llash orqali qishloq xo'jaligini kompleks rivojlantirish istiqbollari»: материалы Междунар. науч.-практ. конф. – 2025. – Р. 352–353.
11. Otamurodova, Sh. T. Nicotinic- and isonicotinic-acid hydrazones of 2-hydroxy-1-naphthaldehyde / Sh. T. Otamurodova, M.A. Tursunov; на узб. яз // «Neft-gazkimyo, yoqilgi sanoati, polimerlar va yuqori molekulyar birikmalar sohasida innovatsion ishlanmalarni raqamlashtirish istiqbollari hamda ekologik jihatlarning ilgor muhandislik yechimlari»: материалы науч.-техн. Междунар. конф. – 2026. – Р. 135–140.

12. Panova, E.V. A pyrazoline-thioamide hybrid: synthesis, crystal structure, electronic landscape and in silico targeting of hemoglobin S / E.V. Panova, M.A. Tursunov, S.T. Otamurodova, D.A. Safin // *Journal of Molecular Structure*. – 2026. – Т. 146649. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022286026014092?via%3Dihub> (дата обращения: 04.08.2026).
13. Rapheal, P.F. Copper(II) complexes of N(4)-substituted thiosemicarbazones derived from pyridine-2-carbaldehyde: crystal structure of a binuclear complex / P.F. Rapheal, E. Manoj, M.R. P. Kurup // *Polyhedron*. – 2007. – Т. 26. – P. 818–828.
14. Sh. T. Otamurodova, M.A. Tursunov; на узб. яз // «Zamonaviy farmatsiyaning dolzarb muammolari va yechimlari»: materials Rep. scientific-practical conf. – 2025. – P. 326–328.
15. Spackman, M.A. Hirshfeld surface analysis / M.A. Spackman, D. Jayatilaka // *CrystEngComm*. – 2009. – Т. 11. – P. 19–32.
16. Tursunov, M.A. Synthesis and crystal structure of nickel(II) and zinc(II) complexes with benzoylacetic aldehyde derivatives / M.A. Tursunov, B.B. Umarov, K.G. Avezov; на англ. яз // *Moscow University Chemistry Bulletin*. – 2019. – Т. 74, № 3. – P. 138–142.
17. Tursunov, M.A. Synthesis and crystal structure of nickel(II) complexes with benzoylactaldehyde / M.A. Tursunov, B.B. Umarov, M. Ya. Ergashov, K.G. Avezov; на англ. яз // *Journal of Structural Chemistry*. – 2021. – Т. 62, № 3. – P. 369–378.
18. Tursunov, M.A. Nickel(II) and zinc(II) complexes with benzoylactaldehyde derivatives / M.A. Tursunov, K.G. Avezov, B.B. Umarov // *Russian Journal of Coordination Chemistry*. – 2019. – Т. 45, № 7. – P. 484–488.

References

1. [Synthesis, structures and properties of Ni(II) and Cu(II) complexes based on fluorinated β -diketone derivatives].- O'zMU.- 120 b. – 2018. (In Russ.)
2. [Nickel(II) complexes with N(4)-substituted thiosemicarbazones obtained from pyridine-2-carbaldehyde: crystal structures, spectral aspects and Hirshfeld surface analysis]. – 2021. – Т. 1237. – S. 130362 (In Russ.)
3. [Study of Ni(II) complexes with aroylhydrazones of the ethyl ester of 5,5-dimethyl-2,4-dioxohexanoic acid].- BukhITI.- 2022.- № 1.- S. 29–33 (In Russ.)
4. [Journal of Structural Chemistry. 2021. P. 394–403] // *Zhurnal strukturnoj khimii*. – 2021. – Т. 62, № 3. (In Russ.)
5. [Synthesis and crystal structures of nickel(II) complexes with derivatives of benzoylactaldehydes] (In Russ.)
6. [Structure and tautomerism in a series of aroylhydrazones of benzoylactaldehyde].- BukhITI.- 2020.- № 4.- S. 59–64 (In Russ.)
7. Tursunov M.A., Umarov B.B., Avezov K.G. [Synthesis and Crystal Structure of Nickel(II) and Zinc(II) Complexes with Benzoylacetic Aldehyde Derivatives]. ISSN 0027–1314, Moscow University Chemistry Bulletin, 2019, Vol. 74, No. 3, P. 138–142. (In Russ.)

8. Tursunov M.A., Umarov B.B., Ergashov M.Ya., Avezov K.G. [Synthesis and crystal structure of the nickel(II) complex with aroyl hydrazone of ethyl ether of 5,5-dimethyl-2,4-dioxohexane acid]. ISSN 0022–4766, Journal of Structural Chemistry, 2020, Vol. 61, No. 1, P. 73–85. (In Russ).
9. Otamurodova Sh.T., Tursunov M.A. [2-gidroksi-1-naftaldegid hosilalari sintezi, tuzilishi va xossalari.] (In Uzb) // Development of science Volume3/ 10 oktyabr/11. P. 266–270.
10. Otamurodova Sh.T., Tursunov M.A., Ganiev B.Sh. [Structure and properties of synthesis of benzoyl hydrazones of monocarbonyl compounds]. (In Engl) “Noqulay iqlim sharoitida zamonaviy agrotexnologiyalar qo'llash orqali qishloq xo'jaligini kompleks rivojlantirish istiqbollari” mavzusidagi xalqaro ilmiy-amaliy konferensiya materiallari. Buxoro. 21-22-aprel. 2025. B.352–353.
11. Otamurodova Sh.T., Tursunov M.A. [Nicotinic- and isonicotinic-acid hydrazones of 2-hydroxy-1-naphthaldehyde] (In Uzb) // «Neft-gazkimyo, yoqilg'i sanoati, polimerlar va yuqori molekulyar birikmalar sohasida innovatsion ishlanmalarni raqamlashtirish istiqbollari hamda ekologik jihatlarning ilg'or muhandislik yechimlari” mavzusidagi ilmiy-texnikaviy xalqaro konferensiya materiallari. Buxoro-2026.10-aprel. III-tom. B.135–140. – 2026.
12. Panova E.V., Tursunov M.A., Otamurodova S.T. & Safin D.A. A pyrazoline-thioamide hybrid: Synthesis, crystal structure, electronic landscape and in silico targeting of hemoglobin S. Journal of Molecular Structure, 146649.(InEngl) – 2026. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022286026014092?via%3Dihub> (дата обращения: 04.08.2026).
13. Rapheal P.F., Manoj E., Kurup M.R.P. Copper (II) complexes of N (4)-substituted thiosemicarbazones derived from pyridine-2-carbaldehyde: Crystal structure of a binuclear complex // Polyhedron. – 2007. – T. 26.
14. Otamurodova Sh.T., Tursunov M.A. [Synthesis, structure and properties of benzalacetone acid hydrazides].(In Uzb) “Zamonaviy farmatsiyaning dolzarb muammolari va yechimlari” mavzusiga bag'ishlangan Respublika ilmiy-amaliy anjuman to'plami. 2025-yil, 16–17-may. B. 326–328.
15. Spackman M.A., Jayatilaka D. Hirshfeld surface analysis. CrystEngComm, 2009, 11, 19–32. (In Engl.).
16. Tursunov M.A., Umarov B.B., Avezov K.G. Synthesis and Crystal Structure of Nickel(II) and Zinc(II) Complexes with Benzoylactic Aldehyde Derivatives. (In Engl) ISSN 0027–1314, Moscow University Chemistry Bulletin, 2019, Vol. 74, No. 3, P. 138–142.
17. Tursunov M.A., Umarov B.B., Ergashov M.Ya., Avezov K.G. [Synthesis and crystal structure of nickel(II) complexes with benzoylactaldehyde].(In Engl) ISSN 0022–4766, Journal of Structural Chemistry, 2021, Vol. 62, No. 3, P. 369–378.
18. Tursunov M.A., Avezov K.G., Umarov B.B. [Nickel(II) and Zinc(II) Complexes with Benzoylactaldehyde Derivatives. Russian Journal of Coordination Chemistry].(In Eng) 2019, Vol. 45, No. 7, P. 484–488.

Статья поступила в редакцию: 10.07.2026

Статья принята к публикации: 16.08.2026

Статья опубликована: 28.08.2026

УДК 628.316.12:661.183

Очистка металлургических промышленных сточных вод сорбентами на основе модифицированного шафирканского бентонита и сапропеля

Раззақов Ҳасан Қаландарович

канд. техн. наук, проф., проф.

кафедры Химии и нефтегазовой технологии, Бухарский государственный университет

Республика Узбекистан, г. Бухара

Амонов Мухтар Рахматович

д-р техн. наук, проф., проф.

кафедры Химии и нефтегазовой технологии Бухарский государственный университет

Республика Узбекистан, г. Бухара

Назаров Сайфулла Ибодуллоевич

д-р техн. наук (DSc)

проф., проф. кафедры Химии и нефтегазовой технологии, Бухарский государственный университет

университет

Республика Узбекистан, г. Бухара

E-mail: s.i.nazarov@buxdu.uz

Treatment of metallurgical industrial wastewater using sorbents based on modified Shafirkan bentonite and sapropel

Razzaqov Hasan

professor, Candidate of Technical Sciences, Professor

of the Department of Chemistry and Oil and Gas Technology, Bukhara State University

Uzbekistan, Bukhara

Amonov Muxtar

doctor of Technical Sciences, Professor, Professor

of the Department of Chemistry and Oil and Gas Technology, Bukhara State University

Uzbekistan, Bukhara

Nazarov Sayfulla

doctor of Technical Sciences, Professor, Professor

of the Department of Chemistry and Oil and Gas Technology, Bukhara State University

Uzbekistan, Bukhara

Аннотация

Цель работы — оценка эффективности композиционного сорбента на основе модифицированного шафирканского бентонита и сапропеля при очистке высокоминерализованных сточных вод третьего гидрометаллургического завода (ГМЗ-3), а

Библиографическое описание: Раззақов Ҳ.Қ., Амонов М.Р., Назаров С.И. Очистка металлургических промышленных сточных вод сорбентами на основе модифицированного шафирканского бентонита и сапропеля // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 8(149). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23214>

также определение его сорбционной ёмкости и оптимальной дозы. Научная новизна состоит в применении композита из местного минерального и органоминерального сырья для одновременного снижения жёсткости, минерализации и извлечения широкого спектра тяжёлых металлов непосредственно из реальных промышленных стоков, а не из модельных растворов. Исходные сточные воды характеризовались высокой общей жёсткостью (85,23 мг-экв/л), значительной минерализацией (сухой остаток 7858 мг/л) и повышенным содержанием ионов тяжёлых металлов. Сорбент получали механической активацией (измельчение до 100 мкм) и термической обработкой при 350 °С. Изучено влияние дозы сорбента (0,1–0,3 %) на эффективность извлечения загрязнителей. При дозе 0,3 % степень очистки по тяжёлым металлам составила от 83,9 % (Cu, Co) до 95,5 % (Cr); максимальная сорбционная ёмкость (при дозе 0,1 %) по никелю, меди и кобальту достигала соответственно 37,4; 19,5 и 12,9 мг/г. Общая жёсткость снизилась в 3,3 раза, суммарное содержание катионов, анионов и сухой остаток уменьшились приблизительно вдвое. Остаточные концентрации Al, Zn, Sr, Mo и Cr достигли нормативного уровня, тогда как Ni, Cu, Co, Mn, As и Se остались выше ПДК и требуют доочистки. Практическая значимость работы заключается в возможности применения композиционного сорбента как ступени глубокой очистки промышленных стоков в составе комбинированной технологии.

Abstract

The aim of this work was to evaluate the efficiency of a composite sorbent based on modified Shafirkan bentonite and sapropel for treating highly mineralized wastewater from the third hydrometallurgical plant (HMP-3), and to determine its sorption capacity and optimal dose. The novelty lies in using a composite of local mineral and organo-mineral raw materials to simultaneously reduce hardness and mineralization and to remove a wide range of heavy metals directly from real industrial effluents rather than from model solutions. The raw wastewater was characterized by high total hardness (85.23 meq/L), significant mineralization (dry residue 7858 mg/L) and elevated concentrations of heavy-metal ions. The sorbent was obtained by mechanical activation (grinding to 100 µm) and thermal treatment at 350 °C. The effect of the sorbent dose (0.1–0.3 %) on pollutant removal was studied. At a dose of 0.3 %, the degree of heavy-metal removal ranged from 83.9 % (Cu, Co) to 95.5 % (Cr); the maximum sorption capacity (at a dose of 0.1 %) for nickel, copper and cobalt reached 37.4, 19.5 and 12.9 mg/g, respectively. The total hardness decreased 3.3-fold, while the total content of cations and anions and the dry residue decreased approximately twofold. The residual concentrations of Al, Zn, Sr, Mo and Cr reached the regulatory level, whereas Ni, Cu, Co, Mn, As and Se remained above the MPC and require post-treatment. The practical significance lies in the possibility of using the composite sorbent as a deep-purification stage for industrial effluents within a combined technology.

Ключевые слова: промышленные сточные воды, гидрометаллургический завод, композиционный сорбент, модифицированный бентонит, сапропель, тяжёлые металлы, сорбционная ёмкость, ПДК, общая жёсткость.

Keywords: industrial wastewater, hydrometallurgical plant, composite sorbent, modified bentonite, sapropel, heavy metals, sorption capacity, MPC, total hardness.

Введение

Интенсивное развитие горно-металлургической отрасли сопровождается образованием значительных объёмов сточных вод, отличающихся высокой минерализацией, повышенной жёсткостью и наличием широкого спектра ионов тяжёлых металлов [6, 9]. Сточные воды гидрометаллургических заводов (ГМЗ), на которых применяются кислотное выщелачивание, сорбционное извлечение металлов и сопутствующие реагентные процессы, представляют особую опасность для окружающей среды из-за одновременного присутствия сульфатов, хлоридов, нитратов, ионов кальция и магния, а также токсичных металлов — никеля, меди, кобальта, молибдена, мышьяка и селена [14, 10, 18].

Традиционные механические и биологические методы очистки в отношении таких вод малоэффективны: высокая солёность подавляет биохимические процессы, а мелкодисперсные и растворённые формы металлов практически не удаляются отстаиванием и фильтрацией [9, 14]. В связи с этим актуальной задачей является разработка комплексных технологий, сочетающих адсорбционные, ионообменные и коагуляционные механизмы очистки на основе доступных и недорогих природных материалов [4, 10].

Перспективными сырьевыми источниками для получения сорбентов являются природные слоистые алюмосиликаты (бентониты) и органоминеральные донные отложения (сапропели). Бентониты обладают развитой удельной поверхностью, катионообменной ёмкостью и способностью к набуханию [6, 11, 16, 13, 17], а сапропель содержит гуминовые вещества и функциональные группы, обеспечивающие комплексообразование с ионами металлов [5, 8]. Химическая, механическая и термическая модификация этих материалов позволяет существенно повысить их сорбционные характеристики [11, 19, 12].

Научная новизна работы состоит в применении композита из местного шафирканского бентонита и сапропеля для одновременного снижения общей жёсткости, минерализации и извлечения широкого спектра тяжёлых металлов непосредственно из реальных высокоминерализованных стоков ГМЗ, а не из модельных растворов. Целью исследования являлась оценка эффективности данного композиционного сорбента при очистке сточных вод ГМЗ-3, определение его сорбционной ёмкости, установление оптимальной дозы и сопоставление достигнутых остаточных концентраций с предельно допустимыми концентрациями (ПДК).

Материалы и методы

Объект исследования — сточные воды третьего гидрометаллургического завода (ГМЗ-3), характеризующиеся высокой минерализацией и повышенным содержанием ионов тяжёлых металлов. Отбор и хранение проб выполняли в соответствии с ГОСТ 31861-2012 [2].

Получение и характеристика сорбента. Композиционный сорбент готовили на основе модифицированного шафирканского бентонита и сапропеля при массовом соотношении компонентов 1:1. Материалы подвергали механической активации — измельчению до размера частиц не более 100 мкм — с последующей термической обработкой при 350 °С, что обеспечивало удаление избыточной влаги, частичную деструкцию органической составляющей и формирование дополнительных активных центров [4, 19]. Текстульные и структурные характеристики сорбента (удельная поверхность по методу БЭТ, объём

и распределение пор, фазовый и функциональный состав) контролировали методами низкотемпературной адсорбции азота, рентгенофазового анализа (РФА), ИК-Фурье-спектроскопии (FTIR) и сканирующей электронной микроскопии (SEM).

Проведение сорбции. Очистку сточной воды проводили в статических условиях. В образцы объёмом 100 мл вносили композитный сорбент в количестве 0,1; 0,15; 0,20; 0,25 и 0,30 % от массы раствора, что при плотности раствора около 1 г/см³ соответствовало дозе 1,0 – 3,0 г/л. Суспензию перемешивали при температуре 25 ± 1 °С и скорости 200 об/мин до достижения сорбционного равновесия, после чего отделяли сорбент фильтрованием и анализировали фильтрат. Все эксперименты выполняли в трёх независимых повторностях, а в работе приведены средние значения полученных результатов.

Аналитические методы. Концентрации тяжёлых металлов (Al, Mn, Ni, Cu, Zn, As, Se, Sr, Mo, Cr и Co) определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS). При необходимости пробы с высоким содержанием металлов предварительно разбавляли до рабочего диапазона измерений. Макрокомпонентный состав (Na^+ , K^+ , NH_4^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{3+} , Fe^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_2^- , NO_3^- , CO_3^{2-} и HCO_3^-), общую жёсткость, сухой остаток, pH, содержание свободного CO_2 и SiO_2 определяли титриметрическими, ионометрическими и гравиметрическими методами в соответствии с действующими стандартными методиками. Степень очистки рассчитывали по уравнению: $E = (C_0 - C)/C_0 \cdot 100$ %, а сорбционную ёмкость q (мг/г) — по формуле $q = (C_0 - C) \cdot V/m$, где C_0 и C — концентрация компонента до и после очистки, V — объём раствора, m — масса сорбента. Остаточные концентрации сопоставляли с ПДК химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования [1].

Результаты и обсуждение

Исходная характеристика сточных вод. Анализ показал, что сточные воды ГМЗ-3 являются высокоминерализованными. В катионном составе преобладали ионы магния (574 мг/л) и кальция (748 мг/л), что определяло высокую общую жёсткость — 85,23 мг-экв/л. Значительными были также содержания натрия (658 мг/л) и калия (245 мг/л). Среди анионов доминировали хлориды (2045 мг/л) и сульфаты (2310 мг/л); присутствие сульфатов связано с применением в технологических процессах реагентов H_2SO_4 , K_2SO_4 , $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ и FeSO_4 [7]. Суммарное содержание анионов составляло 5450,2 мг/л, сухой остаток — 7858 мг/л.

Изменение макрокомпонентного состава. Применение сорбента (доза 0,3 %) привело к снижению суммарного содержания катионов с 2313 до 1137 мг/л и анионов — с 5450,2 до 2372,3 мг/л, то есть приблизительно вдвое (таблица 1). Наиболее выражено уменьшились ионы, определяющие жёсткость: Ca^{2+} — на 66,7 %, Mg^{2+} — на 71,3 %. Существенно снизилось содержание сульфатов (на 62,9 %) и хлоридов (на 48,6 %).

Таблица 1.

Макрокомпонентный (ионный) состав сточных вод ГМЗ-3 до и после очистки, мг/л

Компонент	До очистки	После очистки (0,3 %)	Снижение, %
Катионы			
Na^+	658	521	20,8

Компонент	До очистки	После очистки (0,3 %)	Снижение, %
K ⁺	245	151	38,4
NH ₄ ⁺	32	29	9,4
Ca ²⁺	748	249	66,7
Mg ²⁺	574	165	71,3
Fe ³⁺	32	14	56,3
Fe ²⁺	24	8	66,7
Сумма катионов	2313	1137	50,8
Анионы			
Cl ⁻	2045	1051	48,6
SO ₄ ²⁻	2310	856	62,9
NO ₂ ⁻	1,2	0,34	71,7
NO ₃ ⁻	772	345	55,3
CO ₃ ²⁻	54	22	59,3
HCO ₃ ⁻	268	98	63,4
Сумма анионов	5450,2	2372,3	56,5

Изменение интегральных показателей. Снижение содержания кальция и магния обусловило уменьшение общей жёсткости в 3,3 раза — с 85,23 до 26,2 мг-экв/л (таблица 2). Сухой остаток уменьшился с 7858 до 3689 мг/л, значение pH стабилизировалось вблизи нейтрального (с 7,89 до 7,31). После очистки вода приобрела полную прозрачность, отсутствие цвета и запаха; осадок при отстаивании не образовывался.

Таблица 2.

Интегральные физико-химические показатели сточных вод ГМЗ-3 до и после очистки

Показатель	До очистки	После очистки (0,3 %)
Общая жёсткость, мг-экв/л	85,23	26,2
Карбонатная жёсткость, мг-экв/л	3,79	3,12
Некарбонатная жёсткость, мг-экв/л	81,44	23,08
pH	7,89	7,31
Сухой остаток (эксперим.), мг/л	7858	3689
Сухой остаток (расчётн.), мг/л	7763	3509
Свободный CO ₂ , мг/л	29	24
SiO ₂ , мг/л	8	4
Поглощённые вещества, мг/л	410	374

Извлечение тяжёлых металлов. С увеличением дозы сорбента концентрации всех металлов последовательно снижались (таблица 3). Так, содержание никеля уменьшилось с 62,124 до 9,430 мг/л, меди — с 31,475 до 5,076 мг/л, кобальта — с 21,747 до 3,507 мг/л.

Таблица 3.

Концентрация тяжёлых металлов в сточных водах ГМЗ-3 в зависимости от дозы сорбента и итоговая степень очистки

Металл	Исходная	0,1 %	0,15 %	0,2 %	0,25 %	0,3 %	E, % (0,3 %)
Al	0,173	0,057	0,039	0,025	0,018	0,013	92,5
Mn	1,312	0,469	0,333	0,222	0,173	0,136	89,6
Ni	62,124	24,753	19,450	14,734	11,787	9,430	84,8
Cu	31,475	11,943	9,256	6,568	5,673	5,076	83,9
Zn	0,122	0,035	0,024	0,017	0,013	0,009	92,6
As	0,921	0,270	0,253	0,183	0,122	0,087	90,6
Se	1,142	0,379	0,249	0,162	0,098	0,054	95,3
Sr	4,870	1,710	1,201	0,832	0,601	0,462	90,5
Mo	2,811	0,850	0,611	0,425	0,319	0,239	91,5
Cr	0,223	0,055	0,038	0,024	0,015	0,010	95,5
Co	21,747	8,869	7,632	5,775	4,331	3,507	83,9

Примечание: концентрации приведены в мг/л; E — степень очистки при дозе сорбента 0,3 %.

При дозе 0,3 % степень очистки по всем металлам превышает 80 %; максимальные значения достигнуты для хрома (95,5 %), селена (95,3 %) и цинка (92,6 %), а для металлов с наибольшими исходными концентрациями — Ni, Cu и Co — она составила 84,8; 83,9 и 83,9 % соответственно (рисунок 1)

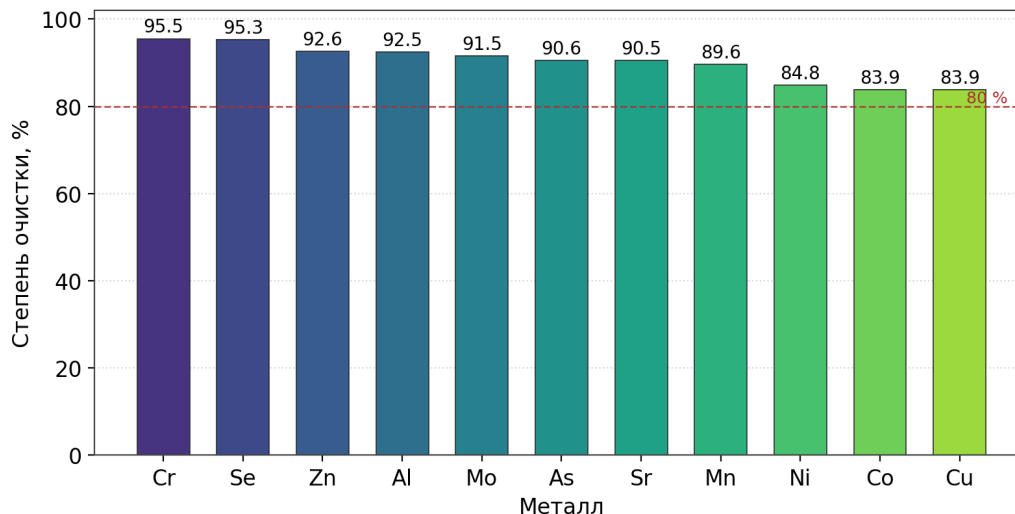


Рисунок 1. Степень очистки сточных вод ГМЗ-3 по тяжёлым металлам при дозе сорбента 0,3 %

Полученные результаты показывают, что при дозе сорбента 0,3 % достигается эффективное извлечение всех исследованных тяжёлых металлов. Наибольшая степень очистки наблюдается для Cr (95,5 %), Se (95,3 %) и Zn (92,6 %), что свидетельствует о высокой аффинности активных центров сорбента к данным ионам. Несколько более низкая эффективность удаления Ni, Cu и Co обусловлена их повышенными исходными

концентрациями и конкуренцией за сорбционные центры. В целом степень очистки по всем исследованным металлам превышает 80 %, что подтверждает перспективность применения разработанного сорбента для очистки промышленных сточных вод

Сорбционная ёмкость. Рассчитанная сорбционная ёмкость q закономерно снижается с ростом дозы сорбента, что характерно для процессов адсорбции: при малых дозах активные центры используются полнее [15]. Для никеля величина q уменьшается с 37,4 мг/г (доза 0,1 %) до 17,6 мг/г (доза 0,3 %), для меди — с 19,5 до 8,8 мг/г, для кобальта — с 12,9 до 6,1 мг/г; для стронция и молибдена максимальная сорбционная ёмкость (доза 0,1 %) составила около 3,2 и 2,0 мг/г соответственно (рисунок 2). Полученные значения ёмкости сопоставимы с литературными данными для модифицированных бентонитовых сорбентов и подтверждают эффективность органоминерального композита при высоких исходных концентрациях металлов.

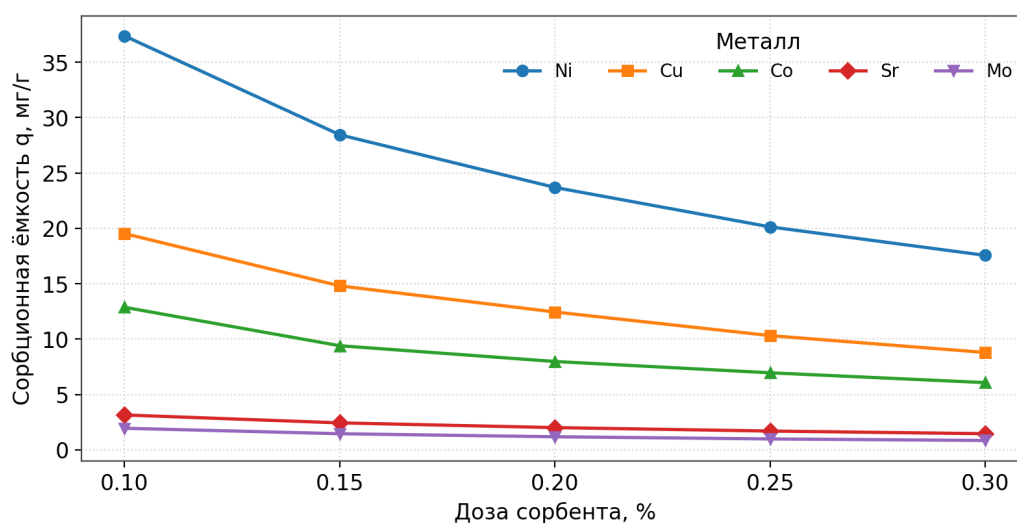


Рисунок 2. Зависимость сорбционной ёмкости q от дозы сорбента для Ni, Cu, Co, Sr, Mo

Зависимость остаточной концентрации от дозы сорбента носит нелинейный характер (рисунок 3): наиболее интенсивное снижение наблюдается в интервале доз 0,1–0,2 %, тогда как при переходе от 0,25 к 0,3 % прирост эффективности замедляется. Это указывает на постепенное заполнение сорбционной ёмкости и позволяет рассматривать интервал 0,2–0,3 % как оптимальный по критерию «степень очистки — расход реагента».

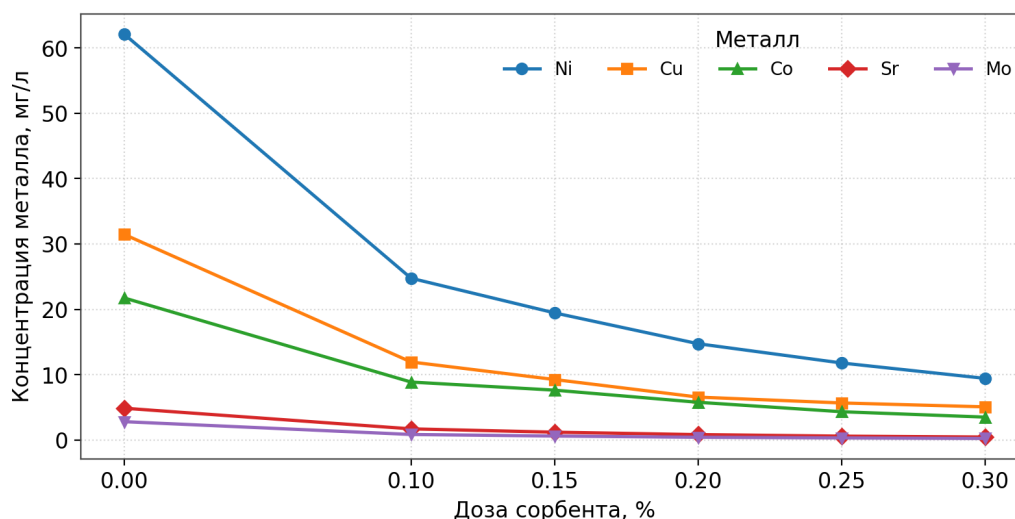


Рисунок 3. Изменение концентрации тяжёлых металлов (Ni, Cu, Co, Sr, Mo) в зависимости от дозы сорбента

Сопоставление с ПДК. Для оценки экологической эффективности остаточные концентрации металлов при дозе 0,3 % сопоставлены с ПДК для водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования [1] (таблица 4). Установлено, что содержание Al, Zn, Sr, Mo и Cr снижается до уровня ниже ПДК, тогда как Ni, Cu, Co, а также As, Se и Mn остаются выше нормативных значений (для никеля и кобальта — на 1–2 порядка). Таким образом, разработанный сорбент обеспечивает глубокое удаление ряда компонентов, однако для достижения нормативного качества по никелю, меди и кобальту требуется доочистка — увеличение дозы, многоступенчатая обработка или комбинирование с ионным обменом либо осаждением.

Таблица 4.

Сопоставление остаточных концентраций тяжёлых металлов (доза 0,3 %) с ПДК

Металл	Остаточная конц., мг/л	ПДК, мг/л	Кратность С/ПДК	Оценка
Al	0,013	0,5	0,03	ниже ПДК
Mn	0,136	0,1	1,4	выше ПДК
Ni	9,430	0,02	471,5	выше ПДК
Cu	5,076	1	5,1	выше ПДК
Zn	0,009	1	0,01	ниже ПДК
As	0,087	0,01	8,7	выше ПДК
Se	0,054	0,01	5,4	выше ПДК
Sr	0,462	7	0,07	ниже ПДК
Mo	0,239	0,25	0,96	ниже ПДК
Cr	0,010	0,05	0,20	ниже ПДК
Co	3,507	0,1	35,1	выше ПДК

Примечание: ПДК приведены по ГН 2.1.5.1315 – 03. Для хрома использована ПДК по Cr(VI), тогда как методом ICP-MS определяли валовое содержание хрома, поэтому оценка по хрому является консервативной. При внедрении технологии следует руководствоваться действующими санитарными нормативами Республики Узбекистан.

Механизм очистки. Комплексное действие композитного сорбента реализуется за счёт нескольких взаимодополняющих механизмов: ионного обмена на межслоевых катионах бентонита, поверхностного комплексообразования с участием гуминовых веществ и функциональных групп сапропеля, а также адсорбции на развитой пористой поверхности, сформированной в процессе модификации сорбента [11, 16, 3]. Совместное протекание этих процессов обеспечивает эффективное извлечение ионов жёсткости, тяжёлых металлов и других растворённых загрязняющих веществ, сопровождающееся снижением общей минерализации очищаемой воды. Комплексный характер взаимодействия позволяет достичь более высокой эффективности очистки по сравнению с использованием отдельных физико-химических методов.

Заключение

1. Разработанный композиционный сорбент на основе модифицированного шафирканского бентонита и сапропеля (соотношение 1:1), полученный измельчением до 100 мкм и термической активацией при 350 °С, проявляет высокую сорбционную способность по отношению к тяжёлым металлам и макрокомпонентам высокоминерализованных сточных вод гидрометаллургического производства.

2. При дозе сорбента 0,3 % степень очистки по тяжёлым металлам составляет от 83,9 % (Cu, Co) до 95,5 % (Cr); высокие значения достигнуты также для Se (95,3 %) и Zn (92,6 %). Максимальная сорбционная ёмкость, рассчитанная при дозе 0,1 %, достигает 37,4 мг/г по Ni, 19,5 мг/г по Cu и 12,9 мг/г по Co; с увеличением дозы до 0,3 % она закономерно снижается (для Ni — до 17,6 мг/г). Оптимальным по критерию «эффективность — расход реагента» является интервал доз 0,2–0,3 %.

3. Очистка сопровождается снижением общей жёсткости в 3,3 раза (с 85,23 до 26,2 мг-экв/л), а также уменьшением суммарного содержания катионов, анионов и сухого остатка приблизительно вдвое; значение pH стабилизируется вблизи нейтрального, органолептические показатели воды улучшаются.

4. Сопоставление с ПДК показало, что остаточные концентрации Al, Zn, Sr, Mo и Cr достигают нормативного уровня, тогда как Ni, Cu, Co, Mn, As и Se остаются выше ПДК и требуют дополнительной доочистки (увеличение дозы, многоступенчатая схема или комбинирование сорбции с ионным обменом либо осаждением). Следовательно, разработанный сорбент целесообразно применять как эффективную ступень предварительной и глубокой очистки в составе комбинированной технологии.

5. Полученные результаты подтверждают перспективность использования сорбентов на основе местного минерального и органоминерального сырья. Дальнейшие исследования целесообразно направить на изучение изотерм и кинетики сорбции, влияния pH и температуры раствора, регенерацию сорбента и оптимизацию состава композита.

Список литературы

1. ГН 2.1.5.1315–03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. — М. — 2003.

2. ГОСТ 31861-2012. Вода. Общие требования к отбору проб. – М.: Стандартинформ, 2013. – 32 с.
3. Когановский А.М., Клименко Н.А., Левченко Т.М. Адсорбция органических веществ из воды. – Л.: Химия, 1990. – 256 с.
4. Смирнов А.Д. Сорбционная очистка воды. – Л.: Химия, 1982. – 168 с.
5. Стрельникова О.Ю., Гурова Н.С. Использование сапропеля для очистки сточных вод от ионов тяжёлых металлов // Вода: химия и экология. – 2015. – № 4.
6. Тарасевич Ю.И. Природные сорбенты в процессах очистки воды. – Киев: Наукова думка, 1981. – 208 с.
7. Химическая технология неорганических веществ / под ред. Т.Г. Ахметова. – М.: Высшая школа, 2002. – 688 с. – М.: Высшая школа, 2002. – 688 с.
8. Albrektienė-Plačakė R., Paliulis D. Albrektienė-Plačakė R., Paliulis D. Investigation on applying sapropel for removal of heavy metals (cadmium, chromium, copper, and zinc) from aqueous solutions // Archives of Environmental Protection. – 2024. – Т. 50, № 2.
9. Bailey S.E., Olin T.J., Bricka R.M., Adrian D.D. A review of potentially low-cost sorbents for heavy metals // Water Research. – 1999. – № 11.
10. Barakat M.A. New trends in removing heavy metals from industrial wastewater // Arabian Journal of Chemistry. – 2011. – № 4.
11. Bhattacharyya K.G., Gupta S.S. Adsorption of a few heavy metals on natural and modified kaolinite and montmorillonite: A review // Advances in Colloid and Interface Science. – 2008. – № 2.
12. Borah D., Nath H., Saikia H. Modification of bentonite clay and its applications: a review // Reviews in Inorganic Chemistry. – 2022. – № 3.
13. Dhar A.K., Himu H.A., Bhattacharjee M., Mostufa M.G., Parvin F. Insights on applications of bentonite clays for the removal of dyes and heavy metals from wastewater: a review // Environmental Science and Pollution Research. – 2023. – № 3.
14. Fu F., Wang Q. Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review // Journal of Environmental Management. – 2011. – № 3.
15. Ho Y.S. McKay G. Pseudo-second order model for sorption processes // Process Biochemistry. – 1999. – № 5.
16. Kubilay S., Gürkan R., Savran A. Şahan T. Removal of Cu(II), Zn(II) and Co(II) ions from aqueous solutions by adsorption onto natural bentonite // Adsorption. – 2007. – № 1.
17. Novikau R., Lujanienė G. Adsorption behaviour of pollutants: heavy metals, radionuclides, organic pollutants, on clays and their minerals (raw, modified and treated): a review // Journal of Environmental Management. – 2022. – Т. 114685.
18. Qasem N.A.A., Mohammed R.H., Lawal D.U. Removal of heavy metal ions from wastewater: a comprehensive and critical review // npj Clean Water. – 2021. – Т. 36.
19. Uddin M.K. A review on the adsorption of heavy metals by clay minerals, with special focus on the past decade // Chemical Engineering Journal. – 2017.

References

1. GN 2.1.5.1315–03. Maximum Permissible Concentrations (MPC) of Chemicals in the Water of Water Bodies for Drinking and Cultural-Domestic Use. Moscow, 2003. Moscow, 2003.
2. GOST 31861-2012. Water. General Requirements for Sampling. Moscow, Standartinform, 2013. 32 P. – Moscow: Standartinform, 2013. – 32 P.
3. Koganovsky A.M., Klimenko N.A., Levchenko T.M. Adsorption of Organic Substances from Water. Leningrad, Khimiya. – 1990. – 256 P.
4. Smirnov A.D. Sorption Water Treatment. Leningrad, Khimiya. – 1982. – 168 P.
5. Strelnikova O.Yu., Gurova N.S. Application of sapropel for the removal of heavy metal ions from wastewater. Water: Chemistry and Ecology, 2015, no. 4, P. 25–31.
6. Tarasevich Yu.I. Natural Sorbents in Water Treatment Processes. Kyiv, Naukova Dumka. – 1981. – 208 P.
7. Akhmetov T.G. (Ed.). Chemical Technology of Inorganic Substances. Moscow, Vysshaya Shkola. – 2002. – 688 P.
8. Albrektienė-Plačakė, R., Paliulis, D. Albrektienė-Plačakė, R., Paliulis, D. Investigation on applying sapropel for removal of heavy metals (cadmium, chromium, copper, and zinc) from aqueous solutions. Archives of Environmental Protection, 2024, vol. 50, P. 55–64 // Archives of Environmental Protection. – 2024. – T. 50, № 2.
9. Bailey S.E., Olin T.J., Bricka R.M., Adrian D.D. A review of potentially low-cost sorbents for heavy metals. Water Research, 1999, vol. 33, no. 11, P. 2469–2479.
10. Barakat M.A. New trends in removing heavy metals from industrial wastewater. Arabian Journal of Chemistry, 2011, vol. 4, no. 4, P. 361–377.
11. Bhattacharyya K.G., Gupta S.S. Adsorption of a few heavy metals on natural and modified kaolinite and montmorillonite: A review // Advances in Colloid and Interface Science. – 2008. – № 2.
12. Borah, D., Nath, H., Saikia, H. Modification of bentonite clay and its applications: a review. Reviews in Inorganic Chemistry, 2022, vol. 42, no. 3, P. 265–282.
13. Dhar A.K., Himu H.A., Bhattacharjee, M., Mostufa M.G., Parvin, F. Insights on applications of bentonite clays for the removal of dyes and heavy metals from wastewater: a review. Environmental Science and Pollution Research, 2023, vol. 30, no. 3, P. 5440–5474.
14. Fu, F., Wang, Q. Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review // Journal of Environmental Management. – 2011. – № 3.
15. Ho Y.S., McKay, G. Pseudo-second order model for sorption processes. Process Biochemistry, 1999, vol. 34, no. 5, P. 451–465.
16. Kubilay, S., Gürkan, R., Savran, A., Şahan, T. Removal of Cu(II), Zn(II) and Co(II) ions from aqueous solutions by adsorption onto natural bentonite. Adsorption, 2007, vol. 13, no. 1, P. 41–51.

-
17. Novikau, R., Lujaniene, G. Adsorption behaviour of pollutants: heavy metals, radionuclides, organic pollutants, on clays and their minerals (raw, modified and treated): a review // Journal of Environmental Management. – 2022. – Т. 114685.
 18. Qasem N.A.A., Mohammed R.H., Lawal D.U. Removal of heavy metal ions from wastewater: a comprehensive and critical review. npj Clean Water, 2021, vol. 4, art. 36.
 19. Uddin M.K. A review on the adsorption of heavy metals by clay minerals, with special focus on the past decade. Chemical Engineering Journal, 2017, vol. 308, P. 438–462.

Статья поступила в редакцию: 23.07.2026

Статья принята к публикации: 28.07.2026

Статья опубликована: 28.08.2026

УДК 664.6; 664.7

Влияние температуры воды при горячем кондиционировании зерна пшеницы сортов «Аср» и «Алексеевич» на органолептические показатели формового хлеба

Узоков Юсуф Ахролович

докторант

Ташкентский химико-технологический институт г. Ташкент, ст. преп., Каршинский
государственный технический университет

Республика Узбекистан, г. Карши

E-mail: Ilmiyizlanuvchi@gmail.com

Баракаев Нусратилла Раджабович

д-р техн. наук, проф.

Алмалыкский государственный технический институт

Республика Узбекистан, г. Алмалык

E-mail: bnr-1967@mail.ru

Суюнова Нилуфар Исмаиловна

магистрант

Каршинский государственный технический университет

Республика Узбекистан, г. Карши

E-mail: nilufar2421@inbox.ru

Effect of water temperature in hot conditioning of wheat grain of the Asr and Alekseevich varieties on the organoleptic properties of pan bread

Uzokov Yusuf

Doctoral Student; Senior Lecturer

Tashkent Institute of Chemical Technology Tashkent; Karshi State Technical University

Republic of Uzbekistan, Karshi

Barakaev Nusratilla

doctor of Technical Sciences, Professor

Almalyk State Technical Institute

Republic of Uzbekistan, Almalyk

Suyunova Nilufar

Master's Student, Karshi State Technical University

Republic of Uzbekistan, Karshi

Библиографическое описание: Узоков Ю.А., Баракаев Н.Р., Суюнова Н.И. Влияние температуры воды при горячем кондиционировании зерна пшеницы сортов «Аср» и «Алексеевич» на органолептические показатели формового хлеба // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 8(149). URL: <https://universum.com/ru/tech/archive/item/23251>

Аннотация

Гидротермическая обработка — один из основных этапов подготовки зерна пшеницы к сортовому помолу, а температура увлажняющей воды остаётся наименее изученным её параметром. В работе исследовано влияние температуры воды (20, 35, 45 и 60 °C) при горячем кондиционировании зерна районированных сортов «Аср» и «Алексеевич» на органолептические показатели качества формового хлеба. Зерно увлажняли до 15,5 % с последующим отволаживанием и размалывали по схеме сортового помола; хлеб, выпеченный безопарным способом, оценивали по семи показателям по пятибалльной шкале с учётом коэффициентов весомости (максимум — 100 баллов). Установлено, что повышение температуры воды с 20 до 35–45 °C улучшает органолептические характеристики хлеба и способствует формированию более равномерной и эластичной структуры мякиша: общая оценка возросла с 79 до 84 баллов для сорта «Аср» и с 78 до 82 баллов для сорта «Алексеевич», тогда как при 60 °C она снижалась до 82 и 80 баллов. Рациональным режимом горячего кондиционирования исследованных сортов является диапазон 35–45 °C.

Abstract

Hydrothermal treatment is one of the main stages in preparing wheat grain for graded milling, and the temperature of the tempering water remains its least studied parameter. The study examines the effect of water temperature (20, 35, 45 and 60 °C) in the hot conditioning of the wheat varieties Asr and Alekseevich on the organoleptic quality of pan bread. The grain was tempered to 15,5 % moisture, rested and milled by a graded milling flowsheet; pan bread baked by the straight-dough method was assessed against seven attributes on a five-point scale with weighting coefficients (maximum 100 points). Raising the water temperature from 20 to 35–45 °C improved the organoleptic characteristics and promoted a more uniform and elastic crumb structure: the total score rose from 79 to 84 points for Asr and from 78 to 82 points for Alekseevich, whereas at 60 °C it fell to 82 and 80 points. Hence 35–45 °C is the rational hot-conditioning range for the varieties studied.

Ключевые слова: пшеница, горячее кондиционирование, температура воды, сортовой помол, формовой хлеб, органолептическая оценка, пористость мякиша.

Keywords: wheat, hot conditioning, water temperature, graded milling, pan bread, organoleptic evaluation, crumb porosity.

Введение

Гидротермическая обработка зерна пшеницы — один из ключевых этапов подготовки к сортовому помолу: она изменяет структурно-механические свойства оболочек и эндосперма и тем самым определяет выход и качество муки, а в конечном счёте — хлебопекарные свойства продукции. При горячем кондиционировании повышается эластичность оболочек и уменьшается переход периферических частиц зерна в муку, что улучшает её цвет, снижает зольность и способствует формированию более благоприятных реологических свойств теста. Качество муки влияет также на интенсивность черствения хлеба, поэтому обоснование рациональной температуры воды имеет практическое значение для стабильности качества

хлебобулочных изделий. Режим кондиционирования должен обеспечивать рациональное соотношение между выходом сортовой муки и количеством отрубей [4]. Среди его параметров наибольшее влияние на выход муки, её зольность и функциональные свойства оказывает достигаемая влажность зерна, тогда как температура и продолжительность отволаживания изучены слабее [6]. Влажность увлажнения определяет также энергоёмкость измельчения, гранулометрический состав продуктов размола и реологические свойства теста [8]. Схема кондиционирования заметно изменяет свойства муки, что показано при сопоставлении одно- и двухступенчатого увлажнения сортов мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) разной твёрдости [5], а технологические свойства теста во многом определяются состоянием клейковинных плёнок [2]. Тепловая обработка ускоряет диффузию влаги, снижает твёрдость зерновки и повышает её пористость, изменяя молекулярное состояние крахмала, белков и целлюлозы [7, 3]. Ранее авторами были рассмотрены методы и режимы гидротермической обработки пшеничного зерна применительно к условиям мукомольных предприятий Республики Узбекистан [1]. Вместе с тем влияние температуры воды при горячем кондиционировании на органолептические показатели хлеба из муки районированных сортов «Аср» и «Алексеевич» не изучено. Цель исследования — установить это влияние (при 20, 35, 45 и 60 °C) и определить рациональный температурный диапазон обработки зерна указанных сортов.

Материалы и методы

Объекты исследования — зерно мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сортов «Аср» и «Алексеевич» урожая 2024 года (Кашкадарьинская область). Исходная влажность зерна составляла 11,8 %, стекловидность — 54 % («Аср») и 48 % («Алексеевич»), содержание сырой клейковины — 27,4 и 26,1 %, натура — 786 и 774 г/л соответственно. Горячее кондиционирование проводили водой с температурой 20 (контроль), 35, 45 и 60 °C. Зерно увлажняли до влажности 15,5 % с отволаживанием 14 ч при 25 °C, после чего размалывали на лабораторной вальцовой мельнице по схеме сортового помола; для пробной выпечки использовали муку высшего сорта. Все варианты опыта различались только температурой воды. Пробную лабораторную выпечку формового хлеба выполняли безопасным способом по ГОСТ 27669-88 (мука — 100 г, прессованные дрожжи — 3,0 г, соль — 1,5 г, вода — по водопоглотительной способности); брожение — 170 мин при 32 °C, расстойка — 55 мин, выпечка — 30 мин при 220 °C. Органолептическую оценку проводила дегустационная комиссия из 7 человек через 4 ч после выпечки по семи показателям. Каждый показатель оценивали по пятибалльной шкале (1–5 баллов), после чего средний балл умножали на установленный экспертным путём коэффициент весомости k_i (приведены в таблице 1). Сумма коэффициентов весомости равна 20, что при максимальном балле 5 соответствует 100 баллам общей оценки качества:

$$Q = \sum (b_i \times k_i),$$

где Q — общая оценка качества, балл; b_i — средний балл по i -му показателю; k_i — коэффициент весомости i -го показателя.

Результаты и обсуждение

Органолептические показатели качества формового хлеба, выпеченного из муки зерна сортов «Аср» и «Алексеевич», обработанного водой различной температуры, приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Органолептические показатели качества формового хлеба из зерна пшеницы сортов «Аср» и «Алексеевич» при разной температуре воды

Показатели качества	k_i	Макс. балл	Сорт «Аср», температура воды				Сорт «Алексеевич», температура воды			
			20 °С	35 °С	45 °С	60 °С	20 °С	35 °С	45 °С	60 °С
Форма и внешний вид хлеба	2	10	8	8	8	8	8	8	8	8
Равномерность окраски корки	2	10	7	8	8	8	7	8	8	8
Состояние поверхности корки	2	10	9	9	9	9	8	8	8	8
Эластичность и состояние мякиша	5	25	20	22	22	21	20	21	21	20
Степень развития пористости мякиша	3	15	11	13	13	12	11	13	13	12
Аромат	3	15	12	12	12	12	12	12	12	12
Вкус	3	15	12	12	12	12	12	12	12	12
Общая оценка качества, балл	20	100	79	84	84	82	78	82	82	80

Примечание. k_i — коэффициент весомости; в графах приведены взвешенные значения (средний балл $\times k_i$). Как видно из таблицы 1, температура воды существенно повлияла на органолептические показатели формового хлеба. Для сорта «Аср» в контроле (20 °С) общая оценка составила 79 баллов, а при 35 и 45 °С — 84 балла; эффект проявился в равномерности окраски корки (с 7 до 8 баллов), эластичности и состоянии мякиша (с 20 до 22 баллов) и степени развития пористости (с 11 до 13 баллов). При 60 °С оценка снизилась до 82 баллов за счёт ухудшения состояния мякиша и его пористости.

Для сорта «Алексеевич» наблюдается та же закономерность: 78 баллов при 20 °С, 82 балла при 35 и 45 °С и 80 баллов при 60 °С. Оценки этого сорта во всех вариантах на 2 балла ниже, чем у сорта «Аср», что, по-видимому, связано с различиями в стекловидности и структурно-механических свойствах зерна.

Улучшение показателей в диапазоне 35–45 °С согласуется с данными о том, что нагрев ускоряет диффузию влаги в зерновку и обеспечивает более равномерное её распределение между оболочками и эндоспермом [7]. Повышенная эластичность увлажнённых оболочек снижает их измельчаемость и переход периферических частиц в муку, вследствие чего мука становится светлее, а окраска корки — более равномерной; более полное увлажнение эндосперма улучшает водопоглотительную способность муки и способствует формированию мелкой и тонкостенной пористости мякиша [8]. Снижение оценки при 60 °С, вероятно,

связано с частичным уплотнением белковых структур и ухудшением эластичности клейковинных плёнок [2]; о существовании температурного оптимума свидетельствуют и работы по сравнению способов тепловой обработки зерна [7, 3].

Заключение

Температура воды при горячем кондиционировании зерна пшеницы оказывает выраженное влияние на органолептическое качество формового хлеба. Обработка зерна сортов «Аср» и «Алексеевич» водой с температурой 35–45 °С обеспечила наиболее высокие значения общей оценки — 84 балла для сорта «Аср» (на 5 баллов выше контроля при 20 °С) и 82 балла для сорта «Алексеевич» (на 4 балла выше контроля). Повышение температуры до 60 °С сопровождалось снижением оценки до 82 и 80 баллов, что может быть связано с частичным изменением технологических свойств белково-клейковинного и крахмального комплексов зерна. Таким образом, рациональным режимом горячего кондиционирования зерна сортов «Аср» и «Алексеевич» следует считать обработку водой с температурой 35–45 °С. Дальнейшие исследования будут посвящены влиянию этих режимов на физико-химические показатели муки, реологию теста и устойчивость хлеба к черствению.

Список литературы

1. Узоков Ю.А., Баракаев Н.Р. Исследование методов и режимов гидротермической обработки пшеничного зерна для повышения эффективности подготовки к помолу на сортовую муку // *Universum: технические науки*. – 2025. – № 12.
2. Girard A.L., Teferra T., Awika J.M. Effects of condensed vs hydrolysable tannins on gluten film strength and stability // *Food Hydrocolloids*. – 2019. – Т. 89.
3. Hassoon W.H., Dziki D. Miś A., Biernacka B. Wheat grinding process with low moisture content: a new approach for wholemeal flour production // *Processes*. – 2021. – Т. 9. – DOI: 10.3390/pr9010032.
4. Hook S.C.W., Bone G.T., Fearn T. The conditioning of wheat: the influence of varying levels of water addition to UK wheats of flour extraction rate, moisture and colour // *Journal of the Science of Food and Agriculture*. – 1982. – Т. 33, № 7.
5. Kurt M., Dizlek H. The effects of two-step tempering treatment on the physical, chemical and technological properties of flour in bread wheats (*Triticum aestivum* L.) // *KSÜ Journal of Agriculture and Nature*. – 2022. – Т. 25, № 1. – DOI: 10.18016/ksutarimdogavi.878636.
6. Kweon M., Martin R., Souza E. Effect of tempering conditions on milling performance and flour functionality // *Cereal Chemistry*. – 2009. – Т. 86, № 1. – DOI: 10.1094/CCHEM-86-1-0012.
7. Liu Y., Jia Z., Li M., Bian K., Guan E. Heat treatment of wheat for improving moisture diffusion and the effects on wheat milling characteristics // *Journal of Cereal Science*. – 2023. – Т. 114. – DOI: 10.1016/j.jcs.2023.103806.
8. Warechowska M., Markowska A., Warechowski J. Miś A., Nawrocka A. Effect of tempering moisture of wheat on grinding energy, middlings and flour size distribution, and gluten and dough mixing properties // *Journal of Cereal Science*. – 2016. – Т. 69.

References

1. Uzokov Yu.A., Barakaev N.R. [Methods and modes of hydrothermal treatment of wheat grain for more efficient preparation for graded milling]. *Universum: tekhnicheskie nauki*, 2025, no. 12 (141), P. 15–19. (In Russ.)
2. Girard A.L., Teferra T., Awika J.M. Effects of condensed vs hydrolysable tannins on gluten film strength and stability. *Food Hydrocolloids*, 2019, vol. 89, P. 36–43.
3. Hassoon W.H., Dziki D., Miś A., Biernacka B. Wheat grinding process with low moisture content: a new approach for wholemeal flour production. *Processes*, 2021, vol. 9, article 32. DOI: 10.3390/pr9010032.
4. Hook S.C.W., Bone G.T., Fearn T. The conditioning of wheat: the influence of varying levels of water addition to UK wheats of flour extraction rate, moisture and colour // *Journal of the Science of Food and Agriculture*. – 1982. – № 7.
5. Kurt M., Dizlek H. The effects of two-step tempering treatment on the physical, chemical and technological properties of flour in bread wheats (*Triticum aestivum* L.). *KSÜ Journal of Agriculture and Nature*, 2022, vol. 25, no. 1, P. 181–190. DOI: 10.18016/ksutarimdogavi.878636.
6. Kweon M., Martin R., Souza E. Effect of tempering conditions on milling performance and flour functionality. *Cereal Chemistry*, 2009, vol. 86, no. 1, P. 12–17. DOI: 10.1094/CCHEM-86-1-0012.
7. Liu Y., Jia Z., Li M., Bian K., Guan E. Heat treatment of wheat for improving moisture diffusion and the effects on wheat milling characteristics // *Journal of Cereal Science*,. – 2023. – DOI: 10.1016/j.jcs.2023.103806.
8. Warechowska M., Markowska A., Warechowski J. Miś A., Nawrocka A. Effect of tempering moisture of wheat on grinding energy, middlings and flour size distribution, and gluten and dough mixing properties // *Journal of Cereal Science*,. – 2016.

Статья поступила в редакцию: 20.08.2026

Статья принята к публикации: 01.08.2026

Статья опубликована: 28.08.2026

УДК 678.745.842

**Исследование самопроизвольной полимеризации акриламида в среде
этиленгликоля и физико-химических свойств получаемых
полиакриламидов**

Хамракулов Илхомжон Меликузи угли
свободный соискатель

ООО Ташкентский научно-исследовательский институт химической технологии
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: ilyachemist92@gmail.com

Файзиев Жахонгир Бахромович
д-р техн. наук (DSc)

ООО Ташкентский научно-исследовательский институт химической технологии
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Нуркулов Файзулла Нурмунинович
д-р техн. наук (DSc)

ООО Ташкентский научно-исследовательский институт химической технологии
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Ахмедов Ориф Жуманазар угли
д-р философии (PhD)

по хим. наукам, ООО Ташкентский научно-исследовательский институт химической
технологии
Республика Узбекистан, г. Ташкент

**Spontaneous polymerization of acrylamide in an ethylene glycol medium and
physicochemical properties of the obtained polyacrylamides**

Khamrakulov Ilkhomjon
Independent Researcher

Tashkent Scientific Research Institute of Chemical Technology LLC
Uzbekistan, Tashkent

Fayziev Jakhongir
doctor of Technical Sciences (DSc)

Tashkent Scientific Research Institute of Chemical Technology LLC
Uzbekistan, Tashkent

Nurkulov Fayzulla
doctor of Technical Sciences, (DSc)

Tashkent Scientific Research Institute of Chemical Technology LLC
Uzbekistan, Tashkent

Akhmedov Orif
doctor of Philosophy (PhD) in Chemistry

Tashkent Scientific Research Institute of Chemical Technology LLC
Uzbekistan, Tashkent

Библиографическое описание: Исследование самопроизвольной полимеризации акриламида в среде этиленгликоля и физико-химических свойств получаемых полиакриламидов // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Хамракулов И.М.У. [и др.]. 2026. 8(149). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23265>

Аннотация

В работе изучена самопроизвольная (безинициаторная) полимеризация акриламида в среде этиленгликоля и оценены физико-химические свойства образующегося полиакриламида. Методология включала проведение реакции при массовых соотношениях акриламид: этиленгликоль 2:1, 1:1 и 1:2, температуре 20–25 °С и продолжительности 24 ч без введения внешнего инициатора; выход продукта определяли гравиметрически, содержание остаточного мономера — по массе непрореагировавшего акриламида, строение продукта подтверждали методом ИК-спектроскопии в диапазоне 4000–500 см⁻¹. Установлено, что состав реакционной среды определяет глубину превращения: при соотношении 2:1 выход полиакриламида составил 21,0 %, при 1:1 — 71,0 %, а максимальное значение 93,7 % достигнуто при соотношении 1:2, где доля остаточного мономера снижается до 5–6 %. Полученные продукты хорошо растворимы в воде, не растворяются в этаноле и большинстве органических растворителей, имеют рН среды 6,0–7,0 и плотность 1,28–1,32 г/см³. В ИК-спектре продукта проявляются полосы амидных групп при 1668 и 1614 см⁻¹ и широкая полоса валентных колебаний О–Н и N–Н при 3332 см⁻¹, тогда как полосы винильной группы мономера (1608 и 986 см⁻¹) существенно ослабевают, что подтверждает протекание полимеризации. Практическая значимость работы состоит в возможности получения полиакриламида в мягких условиях без токсичных инициаторов, что важно для производства водорастворимых флокулянтов, загустителей и гидрогелей медико-биологического назначения.

Abstract

This work examines the spontaneous (initiator-free) polymerization of acrylamide in an ethylene glycol medium and evaluates the physicochemical properties of the resulting polyacrylamide. The reaction was carried out at acrylamide: ethylene glycol mass ratios of 2:1, 1:1 and 1:2, at 20–25 °C for 24 h, without any external initiator; the product yield was determined gravimetrically, the residual monomer content was estimated from the mass of unreacted acrylamide, and the structure of the product was confirmed by FTIR spectroscopy in the 4000–500 cm⁻¹ range. It was found that the composition of the reaction medium governs the conversion depth: the polyacrylamide yield was 21.0 % at a 2:1 ratio, 71.0 % at 1:1, and reached a maximum of 93.7 % at 1:2, where the residual monomer content decreases to 5–6 %. The products obtained are readily soluble in water, insoluble in ethanol and in most organic solvents, and have a medium pH of 6.0–7.0 and a density of 1.28–1.32 g/cm³. The FTIR spectrum of the product shows amide bands at 1668 and 1614 cm⁻¹ and a broad O–H and N–H stretching band at 3332 cm⁻¹, whereas the vinyl-group bands of the monomer (1608 and 986 cm⁻¹) are markedly weakened, which confirms that polymerization has occurred. The practical significance of the work lies in the possibility of obtaining polyacrylamide under mild conditions without toxic initiators, which is important for the production of water-soluble flocculants, thickeners and hydrogels for biomedical applications.

Ключевые слова: акриламид, этиленгликоль, полиакриламид, самопроизвольная полимеризация, безинициаторная полимеризация, ИК-спектроскопия, выход реакции.

Keywords: acrylamide, ethylene glycol, polyacrylamide, spontaneous polymerization, initiator-free polymerization, FTIR spectroscopy, reaction yield.

Введение

Полиакриламид и его производные относятся к числу наиболее востребованных водорастворимых полимеров и широко применяются в качестве флокулянтов при водоподготовке и обогащении руд, загустителей буровых растворов, структурообразователей почв, а также в качестве основы гидрогелей медико-биологического назначения. В традиционных технологиях синтеза используются персульфаты, азоинициаторы, фотоинициаторы и редокс-системы, остаточные количества которых и продукты их распада снижают биобезопасность получаемого материала и ограничивают его применение в контакте с живыми тканями и пищевыми средами [8]. Кроме того, фрагменты иницирующих систем ковалентно встраиваются в макромолекулы в виде концевых групп, влияя на механические, биологические и экологические характеристики продукта, что стимулирует разработку методов получения композиционно однородных полимеров [4].

В связи с этим особый интерес представляет способность акриламида полимеризоваться самопроизвольно, без введения внешнего инициатора, в средах многоатомных спиртов. Ранее было показано, что в смеси с глицерином акриламид полимеризуется уже при комнатной температуре [1, с. 1621–1627]. Позднее установлено, что активные центры такого процесса имеют гидропероксидную природу и представляют собой диамагнитные промежуточные частицы, а не обычные свободные радикалы; этот вывод подтверждён совокупностью данных ЭПР, оптической спектроскопии, ингибирования нитроксильным радикалом и иодометрического анализа [2, с. 1777–1785]. Важно, что активация многоатомного спирта может происходить не только под действием γ -излучения, но и под действием обычного дневного света, а образующиеся гидропероксиды способны инициировать побочные радикальные реакции и в других системах, где такие спирты применяются [2, с. 1777–1785].

Существенную роль в подобных процессах играет структура реакционной среды. Показано, что в протонных ионных жидкостях самопроизвольная полимеризация может инициироваться самим повышением концентрации компонентов, без введения инициатора [9, ст. 4265], а в глубоких эвтектических растворителях на основе четвертичных аммониевых соединений формируется ионно-водородно-связанная микросреда, обеспечивающая быстрое образование эластичных и морозостойких эвтектогелей [7, DOI: 10.1021/acs.langmuir.6c02269]. Поведение ионных и полярных компонентов, влияющих на устойчивость и выделение полимерных дисперсий, рассмотрено также в работе [10].

Этиленгликоль, как и глицерин, является многоатомным спиртом, способным к образованию развитой сетки водородных связей и к эффективной сольватации амидных групп, однако он отличается меньшей вязкостью и иным соотношением гидроксильных групп на молекулу, что должно сказываться на диффузионной подвижности растущих цепей. При этом сведения о самопроизвольной полимеризации акриламида именно в среде этиленгликоля в литературе практически отсутствуют, что и определяет актуальность настоящей работы.

Цель работы — установить влияние состава реакционной среды на самопроизвольную полимеризацию акриламида в этиленгликоле и охарактеризовать физико-химические свойства получаемого полиакриламида.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: 1) провести полимеризацию акриламида в среде этиленгликоля при массовых соотношениях 2:1, 1:1 и 1:2 без введения внешнего инициатора; 2) определить выход продукта и содержание остаточного мономера и установить оптимальное соотношение компонентов; 3) охарактеризовать физико-химические свойства полученных полиакриламидов и подтвердить их строение методом ИК-спектроскопии.

Материалы и методы

В работе использовали акриламид квалификации «ч.д.а.» (ООО «Химмед», Россия) и этиленгликоль квалификации «х.ч.» (Sigma-Aldrich, США). Этиленгликоль использовали без дополнительной очистки, в состоянии поставки производителя. Синтез проводили по методике, ранее апробированной для глицериновой среды [1, с. 1621–1627], без введения внешнего инициатора.

Навеску акриламида растворяли в этиленгликоле при массовых соотношениях акриламид: этиленгликоль 1:1, 1:2 и 2:1. Реакционную смесь выдерживали при температуре 20–25 °С в течение 24 ч в закрытом сосуде при естественном освещении. Образовавшийся полимер осаждали этанолом, отделяли фильтрованием, промывали и сушили до постоянной массы, после чего выход рассчитывали гравиметрически по отношению к исходной массе мономера. Содержание непрореагировавшего акриламида определяли по массе мономера, извлечённого из маточного раствора и промывных жидкостей.

Величину pH реакционной среды измеряли pH-метром при 20–25 °С, плотность продуктов определяли пикнометрическим методом. Растворимость оценивали качественно в воде, этаноле и ряде органических растворителей при комнатной температуре.

ИК-спектры мономера и полученного полимера регистрировали на ИК-Фурье-спектрометре Shimadzu IRAffinity-1S (Shimadzu Corporation, Япония) в диапазоне 4000–500 см⁻¹. Образцы готовили в виде таблеток с KBr спектральной чистоты. Все эксперименты выполняли в трёх параллельных повторностях. В таблицах приведены средние значения результатов. Относительная погрешность определения выхода полимера не превышала ±2,0 %.

Результаты и обсуждение

Результаты самопроизвольной полимеризации акриламида в среде этиленгликоля и физико-химические свойства полученных полиакриламидов приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Самопроизвольная полимеризация акриламида в среде этиленгликоля и физико-химические свойства получаемых полиакриламидов

№	Показатели	Соотношение 1:1	Соотношение 1:2	Соотношение 2:1
1	Температура реакции, °С	20–25	20–25	20–25
2	Продолжительность реакции, ч	24	24	24
3	Выход реакции, %	71,0	93,7	21,0
4	Остаточный акриламид, %	25–30	5–6	75–80
5	pH среды	6,0–7,0	6,5–7,0	6,5–7,0

№	Показатели	Соотношение 1:1	Соотношение 1:2	Соотношение 2:1
6	Плотность, г/см ³	1,28–1,30	1,28–1,32	1,30–1,32
7	Растворимость в воде	хорошо растворим	хорошо растворим	хорошо растворим
8	Растворимость в органических растворителях	не растворяется	не растворяется	не растворяется

Примечание. Молекулярная масса полученных полиакриламидов в настоящей работе не определялась; вискозиметрическое и ГПХ-исследование образцов планируется на следующем этапе работы.

Как следует из представленных данных, глубина превращения существенно зависит от содержания этиленгликоля в реакционной смеси (таблица 1).

При соотношении 2:1 выход продукта составляет лишь 21,0 %. В этом случае содержание мономера относительно велико, а количества растворителя недостаточно для полной сольватации молекул акриламида: возникает локальное загущение среды, ограничивающее подвижность растущих цепей. Поэтому даже при образовании активных центров их эффективное взаимодействие с молекулами мономера затруднено, и глубина полимеризации остаётся низкой. При эквимассовом соотношении 1:1 выход возрастает до 71,0 %, а максимальное значение 93,7 % достигается при соотношении 1:2. В последнем случае этиленгликоль обеспечивает более полное сольватационное окружение молекул акриламида, усиление водородных связей с амидными группами и формирование благоприятных диффузионных условий для роста полимерных цепей. Таким образом, для полимеризации акриламида в среде этиленгликоля при 20–25 °С и продолжительности 24 ч оптимальным следует считать массовое соотношение 1:2.

Полученный вывод подтверждается и данными по содержанию остаточного мономера (таблица 1): рост выхода полимера сопровождается закономерным снижением доли непрореагировавшего акриламида с 75–80 % при соотношении 2:1 до 5–6 % при соотношении 1:2. Это указывает на то, что увеличение доли этиленгликоля повышает не только выход, но и полноту конверсии мономера, что важно с точки зрения токсичности остаточного акриламида в целевом продукте [3].

Строение полученного продукта подтверждено методом ИК-спектроскопии (рисунок 1). В спектре полимера сохраняется интенсивное поглощение амидного фрагмента: полосы при 1668 и 1614 см⁻¹ отвечают валентным колебаниям С=О (амид I) и деформационным колебаниям N–H (амид II). Широкая полоса с максимумом около 3332 см⁻¹ соответствует валентным колебаниям групп О–Н и N–H и свидетельствует о развитой системе водородных связей в образце. Аналогичные полосы амидных групп характерны для полиакриламида, получаемого радикальной полимеризацией [5].

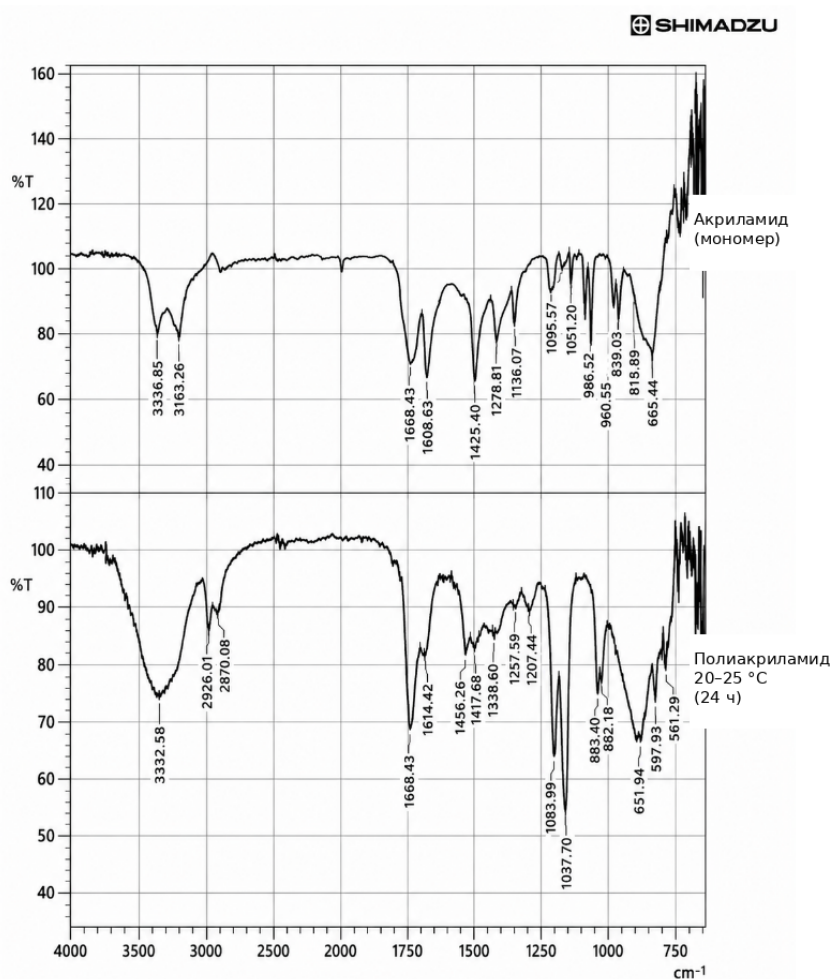


Рисунок 1. ИК-спектры исходного акриламида (верхняя кривая) и полиакриламида, полученного самопроизвольной полимеризацией в среде этиленгликоля (нижняя кривая; 20–25 °С, 24 ч)

Сопоставление спектров мономера и полимера показывает наиболее существенные изменения в области колебаний винильной группы. В спектре исходного акриламида чётко проявляются полосы при 1608 см⁻¹ (валентные колебания C=C) и при 986 и 960 см⁻¹ (внеплоскостные деформационные колебания =CH₂), тогда как в спектре продукта их интенсивность резко снижается, а в области 2926 и 2870 см⁻¹ появляются полосы валентных колебаний C–H насыщенных метиленовых и метиновых групп основной цепи. Совокупность этих изменений однозначно указывает на раскрытие двойной связи и образование полимерной цепи. Полосы в области 1084–1037 см⁻¹ могут быть отнесены к валентным колебаниям C–O этиленгликоля, что указывает на его участие в формировании межмолекулярных взаимодействий в полимерной матрице; окончательное разграничение остаточного растворителя и химически связанных фрагментов требует дополнительных исследований методами ЯМР и элементного анализа.

Полученные результаты согласуются с представлениями о гидропероксидной природе активных центров в системах «многоатомный спирт — акриламид» [2, с. 1777–1785] и показывают, что этиленгликоль, подобно глицерину, способен обеспечивать безинициаторное протекание процесса. При этом достигнутый выход 93,7 % за 24 ч при комнатной температуре сопоставим с показателями, характерными для иницируемых систем [6], что делает рассматриваемый подход практически привлекательным.

Заключение

1. Показана принципиальная возможность самопроизвольной полимеризации акриламида в среде этиленгликоля при 20–25 °С без введения внешнего инициатора.
2. Установлено, что выход полиакриламида определяется массовым соотношением акриламид: этиленгликоль и составляет 21,0 % при соотношении 2:1, 71,0 % при 1:1 и 93,7 % при 1:2; оптимальным при продолжительности 24 ч является соотношение 1:2, при котором доля остаточного мономера снижается до 5–6 %.
3. Полученные полиакриламиды хорошо растворимы в воде, не растворяются в этаноле и большинстве органических растворителей, характеризуются рН среды 6,0–7,0 и плотностью 1,28–1,32 г/см³.
4. Данные ИК-спектроскопии подтверждают образование полиакриламидной структуры: сохраняются полосы амидных групп при 1668 и 1614 см⁻¹, появляются полосы C–H насыщенных групп при 2926 и 2870 см⁻¹ и существенно ослабевают полосы винильной группы мономера.
5. Практическая значимость результатов состоит в возможности получения полиакриламида в мягких условиях без токсичных инициаторов. Дальнейшие исследования будут направлены на изучение кинетики процесса, определение молекулярной массы и молекулярно-массового распределения продуктов, а также на оценку их флокулирующей способности.

Список литературы

1. Большаков А.И., Кирюхин Д.П. Спонтанная полимеризация акриламида в смеси с глицерином // Высокомолекулярные соединения. Серия А. – 2007. – Т. 49, № 9.
2. Большаков А.И., Кузина С.И., Кирюхин Д.П. Активные центры и особенности спонтанной полимеризации акриламида в глицерине // Высокомолекулярные соединения. Серия А. – 2008. – Т. 50, № 10.
3. Braun O., Coquery C., Kieffer J., Blondel F., Favero C., Besset C., Mesnager J., Voelker F., Delorme C., Matioszek D. Spotlight on the Life Cycle of Acrylamide-Based Polymers Supporting Reductions in Environmental Footprint: Review and Recent Advances // Molecules. – 2021. – Т. 27, № 1. – DOI: 10.3390/molecules27010042.
4. Huang W., Zhang X., Chen J., Zhang B., Chen B., Zhang G. Organic Photocatalyzed Polyacrylamide without Heterogeneous End Groups: A Mechanistic Study // ACS Catalysis. – 2023. – Т. 13, № 4. – P. 2542–2546. – DOI: 10.1021/acscatal.2c05972.
5. Klaus M.V.X., Gutierrez A.M., Hilt J.Z. Development of Poly(acrylamide)-Based Hydrogel Composites with Powdered Activated Carbon for Controlled Sorption of PFOA and PFOS in Aqueous Systems // Polymers. – 2023. – Т. 15, № 22. – DOI: 10.3390/polym15224384.
6. Mil-Martínez R., Gómez-López A., Escandón J.P., Jimenez E.M., Martínez-Suástegui L., Vargas R.O. Scale-Up and Control of the Acrylamide Polymerization Process in Solution // Processes. – 2024. – Т. 12, № 8. – DOI: 10.3390/pr12081624.

7. Qin Ch., Li Zh., Liu H., Kan X., Zhang Sh., Wu N., Xu W. An ultrasoft initiator-free eutectogel for strain sensing and gesture recognition assisted by machine learning // *Langmuir*. – 2026. – DOI: 10.1021/acs.langmuir.6c02269.
8. Xiang S., Zhou Z., Kalantar-Zadeh K., Ma B., Bianco A., Ménard-Moyon C. Safe polyacrylamide-based hydrogels with low monomer content achieved by using liquid metal nanoparticles or MoS₂ nanosheets as efficient initiators // *Chemical Engineering Journal*. – 2026. – T. 534. – DOI: 10.1016/j.cej.2026.174942.
9. Zhang J., Zhou X., Hu Q., Zhou K., Zhang Y., Dong S., Zhao G., Zhang S. Concentration-induced spontaneous polymerization of protic ionic liquids for efficient in situ adhesion // *Nature Communications*. – 2024. – T. 4265. – DOI: 10.1038/s41467-024-48561-1.
10. Zhou D., Yan H., Yang Y., Shu X., Chen L., Li C., Ran Q. Investigation of the Effect of Particle Surface Charge and Dispersion Stability on Latex Behavior in Cement Using Non-Ionic and Traditional Latexes // *Materials*. – 2022. – T. 15, № 17. – DOI: 10.3390/ma15176145.

References

1. Bolshakov A.I., Kiryukhin D.P. [Spontaneous polymerization of acrylamide in a mixture with glycerol]. *Vysokomolekulyarnye soedineniya. Seriya A*, 2007, vol. 49, no. 9, P. 1621–1627. (In Russ.)
2. Bolshakov A.I., Kuzina S.I., Kiryukhin D.P. [Active centers and features of spontaneous polymerization of acrylamide in glycerol]. *Vysokomolekulyarnye soedineniya. Seriya A*, 2008, vol. 50, no. 10, P. 1777–1785. (In Russ.)
3. Braun O., Coquery C., Kieffer J., Blondel F., Favero C., Besset C., Mesnager J., Voelker F., Delorme C., Matioszek D. Spotlight on the Life Cycle of Acrylamide-Based Polymers Supporting Reductions in Environmental Footprint: Review and Recent Advances. *Molecules*, 2021, vol. 27, no. 1, art. 42. DOI: 10.3390/molecules27010042.
4. Huang W., Zhang X., Chen J., Zhang B., Chen B., Zhang G. Organic Photocatalyzed Polyacrylamide without Heterogeneous End Groups: A Mechanistic Study. *ACS Catalysis*, 2023, vol. 13, no. 4, P. 2542–2546. DOI: 10.1021/acscatal.2c05972.
5. Klaus M.V.X., Gutierrez A.M., Hilt J.Z. Development of Poly(acrylamide)-Based Hydrogel Composites with Powdered Activated Carbon for Controlled Sorption of PFOA and PFOS in Aqueous Systems. *Polymers*, 2023, vol. 15, no. 22, art. 4384. DOI: 10.3390/polym15224384.
6. Mil-Martínez R., Gómez-López A., Escandón J.P., Jimenez E.M., Martínez-Suástegui L., Vargas R.O. Scale-Up and Control of the Acrylamide Polymerization Process in Solution. *Processes*, 2024, vol. 12, no. 8, art. 1624. DOI: 10.3390/pr12081624.
7. Qin Ch., Li Zh., Liu H., Kan X., Zhang Sh., Wu N., Xu W. An ultrasoft initiator-free eutectogel for strain sensing and gesture recognition assisted by machine learning. *Langmuir*. – 2026. – DOI: 10.1021/acs.langmuir.6c02269.

8. Xiang S., Zhou Z., Kalantar-Zadeh K., Ma B., Bianco A., Ménard-Moyon C. Safe polyacrylamide-based hydrogels with low monomer content achieved by using liquid metal nanoparticles or MoS₂ nanosheets as efficient initiators. *Chemical Engineering Journal*, 2026, vol. 534, art. 174942. DOI: 10.1016/j.cej.2026.174942.
9. Zhang J., Zhou X., Hu Q., Zhou K., Zhang Y., Dong S., Zhao G., Zhang S. Concentration-induced spontaneous polymerization of protic ionic liquids for efficient in situ adhesion. *Nature Communications*, 2024, vol. 15, art. 4265. DOI: 10.1038/s41467-024-48561-1.
10. Zhou D., Yan H., Yang Y., Shu X., Chen L., Li C., Ran Q. Investigation of the Effect of Particle Surface Charge and Dispersion Stability on Latex Behavior in Cement Using Non-Ionic and Traditional Latexes. *Materials*, 2022, vol. 15, no. 17, art. 6145. DOI: 10.3390/ma15176145.

Статья поступила в редакцию: 27.07.2026

Статья принята к публикации: 02.08.2026

Статья опубликована: 28.08.2026

УДК 678.7+669.2

Изучение влияния наполнителей на переработку полиуретановых отходов

Шодиев Аслиддин Фахриддин угли

и.о. доц., кафедра агрономии, Навоийский государственный университет горного дела
и технологий

Республика Узбекистан, г. Навои

E-mail: shodiyevasliddin22@gmail.com

Мухиддинов Баходир Фахриддинович

д-р хим. наук, проф.

кафедры Химическая технология, Навоийский государственный горно-технологический
университет

Республика Узбекистан, г. Навои

Шокиров Равшан Кахрамонович

базовый докторант

кафедры агрономии, Навоийский государственный университет горного дела и технологий

Республика Узбекистан, г. Навои

Study of the influence of fillers on the processing of polyurethane waste

Shodiev Asliddin Fakhriddin ogli

Acting Associate Professor

Department of Agronomy, Navoi State University of Mining and Technology

Republic of Uzbekistan, Navoi

Mukhiddinov Bahadir Fakhriddinovich

professor

of the Department of Chemical Technology, Navoi State University of Mining and Technology

Republic of Uzbekistan, Navoi

Shokirov Ravshan Kakhramonovich

Basic doctoral student

Department of Agronomy, Navoi State University of Mining and Technology

Republic of Uzbekistan, Navoi

Аннотация

В данной статье исследовано влияние минеральных наполнителей различной природы и концентрации на физико-механические свойства термореактивного полиуретанового материала, полученного при переработке отходов полиуретана. Были изготовлены образцы с различным содержанием минеральных наполнителей и изучено их влияние на плотность,

Библиографическое описание: Шодиев А.Ф.У., Мухиддинов Б.Ф., Шокиров Р.К. Изучение влияния наполнителей на переработку полиуретановых отходов // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 8(149). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23247>

относительное удлинение, прочность при растяжении и линейную усадку композиционного материала. В процессе подготовки образцов полиуретановые отходы подвергали термическому плавлению при температуре 110–120 °С. Для получения однородного расплава смесь непрерывно перемешивали на протяжении всего процесса. В полученную гомогенную массу вводили 18 % 4,4'-метилendifенилдиизоцианата, после чего композицию гомогенизировали в течение 3 минут при скорости вращения 1800 об/мин. На данной стадии из расплава удаляли растворённые газы и воздушные пузырьки, что обеспечивало получение однородной и дефектно-свободной структуры материала. В качестве минеральных наполнителей использовали тальк ($\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$), оксид алюминия (Al_2O_3), карбонат кальция (CaCO_3), сульфат бария (BaSO_4), диоксид кремния (SiO_2) и углерод (C). Наполнители вводили в расплав в концентрациях 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9 и 1,0 %. После введения наполнителей композиционную суспензию дополнительно перемешивали при температуре 110–120 °С со скоростью 1800 об/мин в течение 2 минут, после чего заливали в подготовленные формы. Для полученных образцов были определены плотность, прочность при растяжении, относительное удлинение при разрыве и линейная усадка, а также проведена сравнительная оценка влияния типа и концентрации минеральных наполнителей на изменение указанных физико-механических характеристик.

Abstract

This study investigates the effect of mineral fillers with different chemical compositions and concentrations on the physicomachanical properties of thermosetting polyurethane materials obtained through the recycling of polyurethane waste. Samples containing various mineral fillers were prepared, and their influence on the density, elongation at break, tensile strength, and linear shrinkage of the composite material was evaluated. During sample preparation, polyurethane waste was thermally melted at 110–120 °C. To obtain a homogeneous melt, the mixture was continuously stirred throughout the entire process. Subsequently, 18 % of 4,4'-methylenediphenyldiisocyanate was introduced into the homogeneous melt, followed by homogenization at a stirring speed of 1800 rpm for 3 min. At this stage, dissolved gases and entrapped air bubbles were removed from the melt, ensuring the formation of a homogeneous, defect-free material structure. Talc ($\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$), aluminum oxide (Al_2O_3), calcium carbonate (CaCO_3), barium sulfate (BaSO_4), silicon dioxide (SiO_2), and carbon (C) were used as mineral fillers. The fillers were incorporated into the melt at concentrations of 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, and 1.0 %. After filler addition, the composite suspension was further mixed at 110–120 °C and 1800 rpm for 2 min, after which it was poured into prepared molds. The density, tensile strength, elongation at break, and linear shrinkage of the obtained samples were determined. Furthermore, a comparative evaluation was carried out to assess the influence of the type and concentration of mineral fillers on the variation of these physicomachanical properties.

Ключевые слова: термореактивный полиуретан, отходы полиуретана, карбонат кальция, оксид алюминия, расплав полимера, минеральные наполнители, модификатор, тальк, 4, 4'-метилendifенилдиизоцианат, реологические свойства, вязкость расплава, полимерные композиты, макромолекулярная структура, сульфат бария, диоксид кремния, углерод.

Keywords: Thermosetting polyurethane, polyurethane waste, calcium carbonate, aluminum oxide, polymer melt, mineral filler, modifier, talc, 4, 4'-methyl enediphenyl diisocyanate (MDI), rheological properties, melt viscosity, polymer composites, macromolecular structure, barium sulfate, silicon dioxide, carbon.

Введение

В последние годы в связи с быстрым ростом объемов производства полиуретановых материалов наблюдается значительное увеличение количества полиуретановых отходов. Особое место среди них занимают термореактивные полиуретаны на основе 4,4'-метилен дифенилдиизоцианата, которые благодаря высокой механической прочности, эластичности, износостойкости и химической стабильности широко применяются в машиностроении, горнодобывающей промышленности, транспорте, строительстве и химической промышленности. Однако вследствие наличия трехмерной пространственной сетчатой структуры макромолекул переработка данных материалов после окончания срока эксплуатации является сложной задачей, в результате чего они относятся к числу основных промышленных отходов, создающих экологические проблемы. В настоящее время широко исследуются механические, химические, гликолизные, аминолизные, гидролизные и термохимические методы переработки полиуретановых отходов на основе МДИ. Среди указанных методов термохимическая переработка отличается относительно низким энергопотреблением, технологической простотой и возможностью сохранения эксплуатационных свойств переработанного материала. Вместе с тем в процессе переработки частичное термоокисление макромолекул полиуретана и деструкция полимерных цепей могут приводить к ухудшению реологических, термических и физико-механических свойств материала [10]. В связи с этим исследование взаимодействия полимерной структуры с различными минеральными наполнителями имеет важное научное и практическое значение. В международных исследованиях последних лет такие минеральные наполнители, как тальк ($\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$), оксид алюминия (Al_2O_3), карбонат кальция (CaCO_3), сульфат бария (BaSO_4), диоксид кремния (SiO_2) и углерод (C), широко изучаются в качестве эффективных модифицирующих компонентов, способных улучшать термическую стабильность, модуль упругости, износостойкость и реологические свойства полиуретановых композитов. Тальк, обладающий слоистой силикатной структурой, регулирует подвижность полимерных цепей, способствует снижению внутренних напряжений и повышению устойчивости материала к термической деформации. Оксид алюминия, благодаря высокой твердости и теплопроводности, способствует повышению микротвердости и улучшению триботехнических свойств композитов. Карбонат кальция, в свою очередь, выполняя функцию дисперсной фазы в полимерной структуре, позволяет повысить жесткость, обеспечить объемную стабильность и снизить себестоимость композитного материала [6, 4]. Эффективность минеральных наполнителей определяется не только их механическим армирующим воздействием, но и степенью диспергирования в полимерной матрице, а также характером межфазного взаимодействия. В связи с этим реологические свойства переработанных полиуретановых композиций, включая основные реологические параметры, являются одними из ключевых факторов, определяющих формуемость полимера,

равномерность распределения наполнителя и структурную целостность конечного продукта. Вместе с тем анализ имеющихся научных публикаций показывает, что влияние наполнителей в низких концентрациях (0,1–1,0 %) на реологические свойства термореактивных полиуретановых отходов на основе МДИ, механизм их диспергирования в процессе термохимической переработки, а также их взаимодействие с макромолекулярной структурой изучены недостаточно. Особый интерес представляет также определение влияния концентрации минеральных наполнителей на такие свойства полимерного расплава, как плотность, прочность при разрыве, относительное удлинение и линейная усадка. Полученные результаты могут служить теоретической и практической основой для разработки вторичных полиуретановых композиций с повышенной износостойкостью, термической стабильностью и энергоэффективностью [1].

Объект исследования. В качестве объектов исследования были выбраны 4,4'-метилendifенилдиизоцианат, используемый в качестве связующего компонента, отходы полиуретана, а также минеральные наполнители: тальк ($\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$), оксид алюминия (Al_2O_3), карбонат кальция (CaCO_3), сульфат бария (BaSO_4), диоксид кремния (SiO_2) и углерод (C). Для проведения процесса переработки использовали специальные реакторы с системой плавления и перемешивания.

Методика исследования

Отходы полиуретана измельчали с использованием специальной дробильной установки до размеров 3×5 мм, после чего промывали и очищали от различных пылевых загрязнений, масел и песчано-глинистых примесей с применением растворителя — дихлорэтана. Затем образцы сушили при температуре 80 ± 2 °С в течение 2 часов [8].

После этого подготовленные образцы помещали в реактор и расплавляли при температуре 110–120 °С. С использованием специального смесителя получали гомогенный полимерный расплав. Для образования активных центров в макромолекулярных цепях в процессе переработки к общей массе расплава добавляли 18 % 4,4'-метилendifенилдиизоцианата. Полученную смесь гомогенизировали в течение 3 минут при скорости вращения 1800 об/мин.

Каждый минеральный наполнитель вводили в полимерную композицию в количестве 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9 и 1,0 % от массы полимера. После этого определяли значения основных физико-механических характеристик полученных композиций, включая плотность, прочность при разрыве, относительное удлинение и линейную усадку [5].

Результаты и обсуждение

Проведенные исследования были направлены на оценку влияния минеральных наполнителей на структурные и физико-механические свойства композитных материалов в процессе термохимической переработки термореактивных полиуретановых отходов на основе МДИ. Результаты экспериментов показали, что введение в состав полиуретанового расплава минеральных наполнителей, таких как BaSO_4 , Al_2O_3 , SiO_2 , CaCO_3 , тальк и углерод, в концентрациях 0,1–1,0 % приводит к существенному изменению адгезионных свойств композитов. Установлено, что равномерное распределение частиц наполнителя в полимерной

матрице способствует увеличению плотности композитов. Вместе с тем увеличение концентрации наполнителя приводит к ограничению подвижности функциональных групп, формирующих полимерные цепи, что сопровождается снижением относительного удлинения при разрыве и показателей линейной усадки. Прочность при разрыве при низких концентрациях наполнителя увеличивалась и достигала оптимального значения при концентрации 0,5–0,7 %, тогда как при дальнейшем повышении концентрации наблюдалось ее определенное снижение. Полученный эффект может быть объяснен взаимодействием свободных радикалов, содержащихся в функциональных группах, формирующих основную полимерную цепь, с частицами минеральных наполнителей с образованием элементарно-органических связей. Технологические параметры применения наполнителей при переработке полиуретановых отходов представлены в следующей таблице.

Таблица 1.

Технологические параметры минеральных наполнителей при переработке полиуретановых отходов на основе МДИ

№	Наименование наполнителя	Химическая формула	Размер частиц наполнителя, нм	Температура смешения, °С	Скорость смешения, об/мин
1	Тальк	$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$	2–10	110–120	1500
2	Оксид алюминия	Al_2O_3	0,5–10		1800
3	Карбонат кальция	$CaCO_3$	1–5		1800
4	Сульфат бария	$BaSO_4$	0,5–5		1500
5	Диоксид кремния	SiO_2	0,5–0,8		1800
6	Углерод	C	0,25–0,54		2000

В таблице приведены основные технологические параметры минеральных наполнителей, использованных для получения переработанных полиуретановых композиций на основе МДИ. Размер частиц наполнителей, температура и скорость смешения обеспечивают их равномерное диспергирование в полимерной структуре и способствуют усилению межфазного взаимодействия с макромолекулярными цепями. В результате существенно улучшаются реологические свойства и эксплуатационная прочность композитного материала.

Таблица 2.

Зависимость свойств переработанных полиуретановых композиций на основе МДИ от концентрации наполнителя

№	Наименование наполнителя	Содержание наполнителя, %	Полиуретановые отходы, %	Связующее — МДИ, %
1	Контрольный образец	Отсутствует	82	18
2	$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$	0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9 и 1,0	81,8; 81,6; 81,4; 81,2; 81,0	18
3	Al_2O_3	0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9 и 1,0	81,8; 81,6; 81,4; 81,2; 81,0	18
4	$CaCO_3$	0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9 и 1,0	81,8; 81,6; 81,4; 81,2; 81,0	18
5	$BaSO_4$	0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9 и 1,0	81,8; 81,6; 81,4; 81,2; 81,0	18

№	Наименование наполнителя	Содержание наполнителя, %	Полиуретановые отходы, %	Связующее — МДИ, %
6	SiO ₂	0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9 и 1,0	81,8; 81,6; 81,4; 81,2; 81,0	18
7	C	0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9 и 1,0	81,8; 81,6; 81,4; 81,2; 81,0	18

В таблице представлены составы переработанных полиуретановых композиций на основе связующего МДИ при поэтапном увеличении содержания минеральных наполнителей в диапазоне от 0,1 до 1,0 %. Установлено, что изменение концентрации наполнителя оказывает влияние на уплотнение полимерной структуры, равномерность диспергирования частиц, а также на формирование оптимальных реологических и эксплуатационных свойств композиций [7].

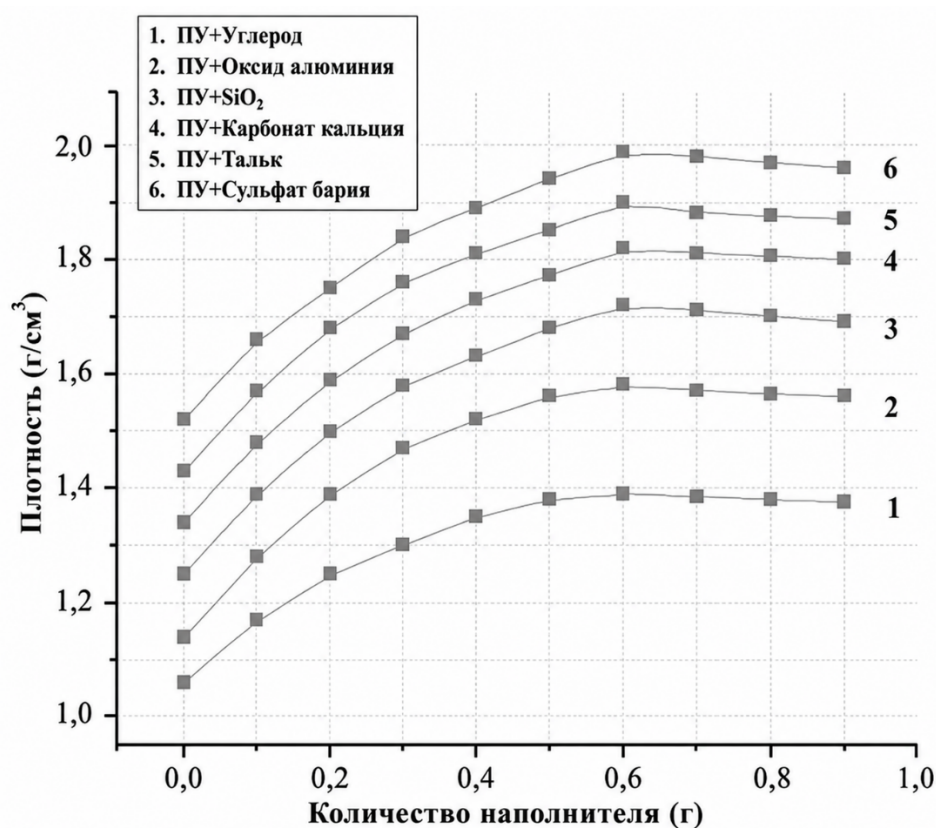


Рисунок 1. Зависимость плотности полиуретана от содержания наполнителя:

На представленном графике показано, что при увеличении содержания таких наполнителей, как углерод (C), диоксид кремния (SiO₂), карбонат кальция (CaCO₃), тальк (Mg₃Si₄O₁₀(OH)₂) и сульфат бария (BaSO₄), в диапазоне 0,1–1,0 % плотность переработанных полиуретановых композиций на основе МДИ последовательно возрастает. Это свидетельствует о равномерном диспергировании минеральных частиц наполнителя в полимерной матрице и усилении межфазной адгезии на границе раздела «полимер–наполнитель» [13]. Установлено, что использование наполнителей в виде сульфата бария и талька позволяет получать композитные материалы с повышенной плотностью.

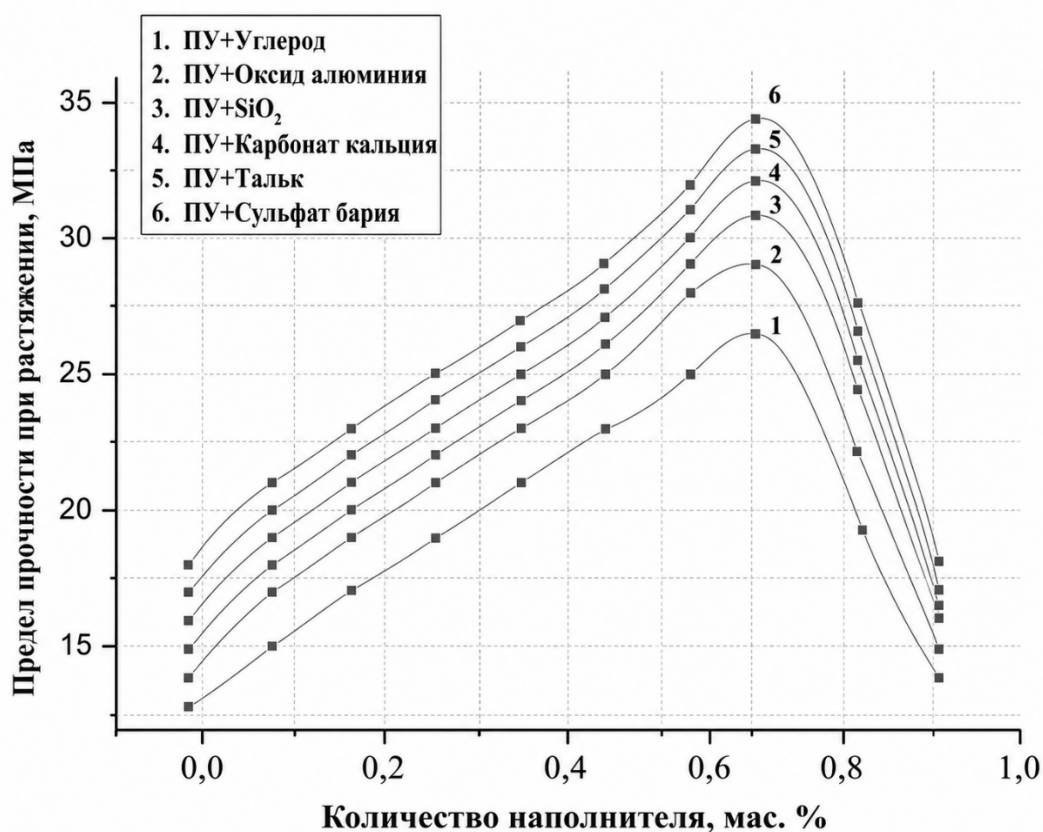


Рисунок 2. Зависимость прочности полиуретана при разрыве от концентрации наполнителя:

На основании полученных результатов установлено, что во всех исследованных образцах с увеличением концентрации наполнителя прочность при разрыве последовательно возрастала и достигала максимального значения при концентрации 0,7 %. При этом образцы, модифицированные BaSO_4 и Al_2O_3 , демонстрировали наиболее высокие показатели прочности. Это может быть обусловлено высокой дисперсностью наполнителей, усилением межфазной адгезии на границе «полимер–наполнитель» и эффективной передачей механических напряжений. Частицы SiO_2 , талька и CaCO_3 , выступая в качестве твердой дисперсной фазы, также способствовали усилению межсегментного взаимодействия и снижению вероятности образования микротрещин [11, 12]. Однако при увеличении концентрации наполнителя в диапазоне от 0,7 до 1,0 % наблюдалось снижение прочности при разрыве. Это, вероятно, связано с чрезмерным уплотнением полимерной структуры, вследствие чего подвижность макромолекул несколько ограничивается.

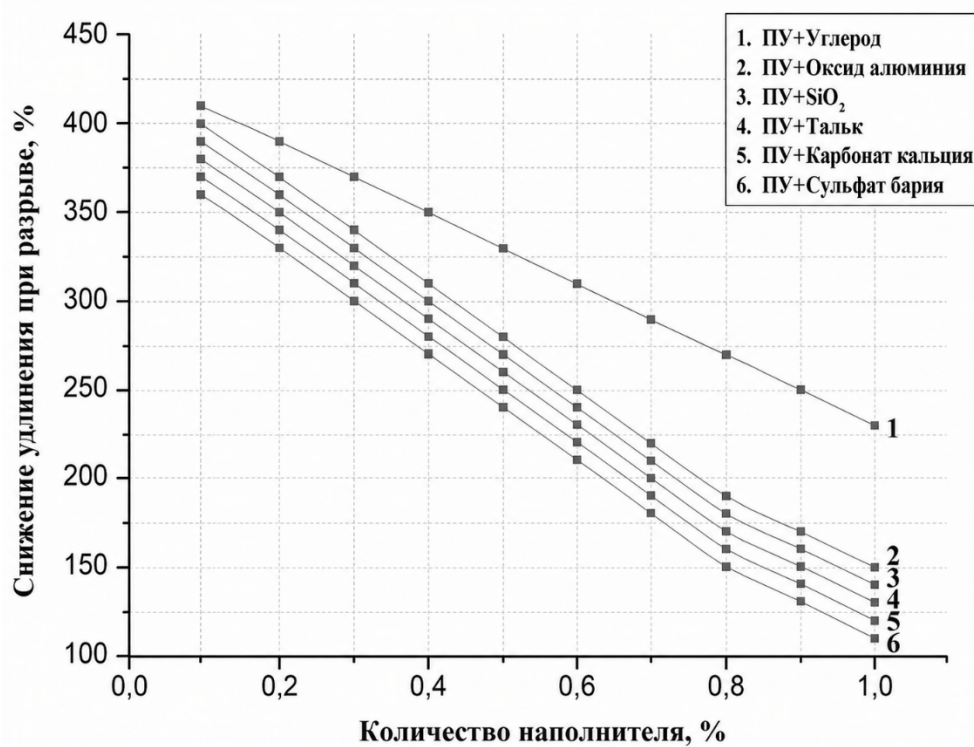


Рисунок 3. Зависимость относительного удлинения полиуретана от содержания наполнителя

При увеличении содержания минеральных наполнителей в диапазоне 0,1–1,0 % наблюдалось последовательное снижение относительного удлинения полиуретановых композиций. Данный эффект может быть объяснен усилением межмолекулярного взаимодействия между частицами наполнителя и полимерными цепями полиуретана, ограничением подвижности макромолекулярных цепей и снижением способности материала к упругой деформации. Неорганические наполнители, такие как BaSO_4 , Al_2O_3 и SiO_2 , за счет повышения жесткости полимерной структуры способствуют более значительному снижению относительного удлинения при разрыве. Вместе с тем установлено, что по сравнению с другими образцами композиции на основе углерода и талька сохраняют относительно более высокую эластичность [3]. При высоких концентрациях наполнителей снижение деформационной способности на межфазных границах приводит к ограничению подвижности полимерных цепей. В результате минеральные наполнители могут способствовать снижению эластических свойств полиуретановых композитов.

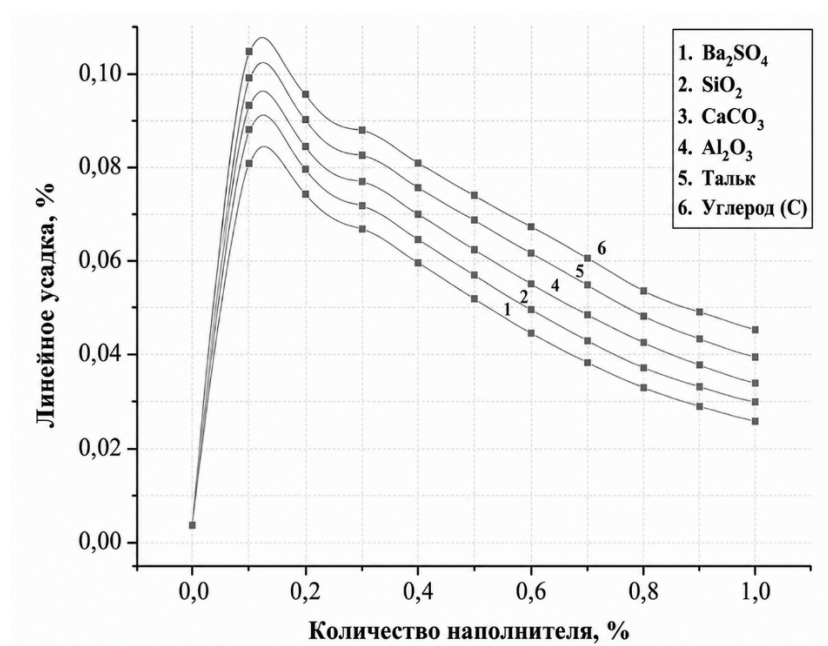


Рисунок 4. Зависимость линейной усадки образцов ПУ от содержания наполнителя

На рисунке представлена зависимость линейной усадки полиуретановых композиций от содержания минерального наполнителя. Линейная усадка рассчитывалась по следующим формулам:

$$S = \frac{L_0 - L_1}{L_1} \times 100$$

где: S — линейная усадка, %; L_0 — первоначальная длина образца, мм; L_1 — длина готового образца после охлаждения, мм.

Из представленных результатов видно, что линейная усадка исследуемых образцов достигает максимального значения при концентрации наполнителя 0,1 %, после чего в диапазоне 0,2–1,0 % постепенно уменьшается. Данный эффект может быть объяснен ограничением подвижности функциональных групп в полимерных цепях под воздействием минеральных частиц и усилением межфазной адгезии. Неорганические наполнители, такие как BaSO₄, SiO₂, CaCO₃ и Al₂O₃, способствуют перераспределению внутренних напряжений в процессе отверждения и снижению объемной деформации. При высоких концентрациях наполнителей в композициях на основе талька и углерода линейная усадка остается относительно низкой, что свидетельствует об их эффективном армирующем воздействии в системе «полимер–наполнитель» [2, 9].

Заключение

В проведенном исследовании в процессе термохимической переработки термореактивных полиуретановых отходов на основе МДИ в качестве минеральных наполнителей были использованы Mg₃Si₄O₁₀(OH)₂, Al₂O₃, CaCO₃, BaSO₄, SiO₂ и С. Были подготовлены образцы с различным содержанием наполнителей и исследовано влияние их концентрации на физико-механические свойства полученных композитных материалов.

Установлено, что применение выбранных наполнителей в диапазоне концентраций 0,2–1,0 % приводит к увеличению плотности композитного материала с 1,17 до 1,32–1,38 г/см³, снижению линейной усадки с 0,28 до 0,16 мм, а также повышению прочности при разрыве с 18,5 до 31–34 МПа. Повышение прочности при разрыве обусловлено высокой поверхностной энергией и сильным межфазным взаимодействием наполнителей SiO₂ и Al₂O₃ с полимерной матрицей. Установлено, что BaSO₄ обеспечивает наиболее значительное повышение плотности композита — до 1,38 г/см³. Углерод (С), благодаря сохранению относительно высокой подвижности эластичных сегментов, способствует увеличению относительного удлинения с 245 до 305 %. Mg₃Si₄O₁₀(OH)₂ и CaCO₃ регулируют ориентацию полимерных цепей и, наряду с другими минеральными наполнителями, позволяют снизить себестоимость производства композитных материалов. Таким образом, результаты исследования показывают, что использование минеральных наполнителей в процессе термохимической переработки полиуретановых отходов на основе МДИ позволяет целенаправленно регулировать физико-механические свойства вторичных полиуретановых композиций и получать материалы с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Список литературы

1. Буркин А.Н., Радюк А.Н. Оценка качества подошв обуви, полученных из отходов пенополиуретанов // Союз науки и практики: актуальные проблемы и перспективы развития товароведения. – 2021.
2. Захарян Е.М., Максимов А.Л. Пиролиз полиуретанов. Особенности процесса и состав продуктов реакции (обзор) // Журнал прикладной химии, издательство Наука. С.-Петерб. отд-ние (СПб.). – 2022. – Т. 95.
3. Крещик А.А. Использование полиуретановых отходов литейного производства для наполненных противоскользящих напольных покрытий // Инновационная наука. – 2024.
4. Мухиддинов Б.Ф., Шодиев А.Ф. Установки для переработки отходов пластмасс и получение композиции на их основе // Journal of Advances in Engineering Technology. – 2021.
5. Стородубцева Т.Н., Шакирова О.И. Использование древесных отходов в качестве заполнителя полимерного композита // ББК 35.71+ 35.74 я43 С23. – 2023.
6. Чавуш В., Менгелоглу Ф. Çavuş V., Mengeloğlu F. Effect of the Filler Content on Some Physical and Mechanical Properties of Virgin-and Recycled Thermoplastic Polyurethane Composites // BioResources. – 2024. – Т. 19.
7. Шайдурова Г.И., Васильев И.Л., Шевяков Я.С. Особенности биodeградации промышленных отходов полимеров и перспективы вторичного использования углеродных наполнителей // Материалы и технологии нового поколения для перспективных изделий авиационной и космической техники. – 2021.
8. Шодиев А.Ф. Изучение влияния количества 4, 4-метилдифенилдиизо цианата при переработке термореактивных полиуретановых отходов // International Journal of Advanced Technology and Natural Sciences. – 2023. – Т. 4.

9. Magiera A. Kuźnia M., Jerzak W. Analysis of the Structural, Chemical, and Mechanical Characteristics of Polyurethane Foam Infused with Waste from Thermal Processing // *Materials*. – 2025. – T. 18. – DOI: 10.3390/ma18061327.
10. Ochigüe P.C.D. et al. Upcycling PVC and PET as Volume-Enhancing Functional Fillers for the Development of High-Performance Bio-Based Rigid Polyurethane Foams // *Sustainability*. – 2024. – T. 16, № 19.
11. Polecki K. et al. Polyurethane Recycling: Sustainable Development Perspectives and Innovative Approaches // *Materials*. – 2026. – T. 19.
12. Sapaev I. et al. A Mini-Review on the Studies Done on the Acidification of Carbonate Rock Matrix // *Chemical Methodologies*. – 2025. – T. 9.
13. Selvaraj V.K. et al. Optimized recycling of e-waste and tire rubber into sustainable polyurethane composites with enhanced compressive performance // *Scientific Reports*. – 2026.

References

1. Burkin A.N., Radyuk A.N. [Assessment of the Quality of Shoe Soles Obtained from Polyurethane Foam Waste] // *Soyuz nauki i praktiki: aktual'nye problemy i perspektivy razvitiya tovarovedeniya*. – 2021. (In Russ.)
2. Zakharyan E.M., Maksimov A.L. [Pyrolysis of Polyurethanes. Process Characteristics and Composition of Reaction Products (Review)] // *Zhurnal prikladnoj khimii, izdatel'stvo Nauka. S.-Peterb. otd-nie (SPb.)*. – 2022. – T. 95. (In Russ.)
3. [Use of Polyurethane Waste from Foundry Production for Filled Non-Slip Floor Coverings] // *Innovatsionnaya nauka*. – 2024. (In Russ.)
4. Mukhiddinov B.F., Shodiev A.F. [Installations for Processing Plastic Waste and Obtaining Compositions Based on Them] // *Journal of Advances in Engineering Technology*. – 2021. (In Russ.)
5. Storodubtseva T.N., Shakirova O.I. [Use of Wood Waste as a Filler for Polymer Composites] // *BBK 35.71+ 35.74 ya43 S23*. – 2023. (In Russ.)
6. Чавуш В., Менгелоглу Ф. Çavuş V., Mengeloğlu F. [Effect of the Filler Content on Some Physical and Mechanical Properties of Virgin-and Recycled Thermoplastic Polyurethane Composites] // *BioResources*. – 2024. – T. 19. (In Russ.)
7. Shajdurova G.I., Vasil'ev I.L., Shevyakov Ya.S. [Characteristics of Biodegradation of Industrial Polymer Waste and Prospects for Secondary Use of Carbon Fillers] // *Materialy i tekhnologii novogo pokoleniya dlya perspektivnykh izdelij aviatsionnoj i kosmicheskoy tekhniki*. – 2021. (In Russ.)
8. [Study of the Effect of 4,4-Methylenediphenyl Diisocyanate Content in the Processing of Thermoset Polyurethane Waste] // *International Journal of Advanced Technology and Natural Sciences*. – 2023. – T. 4. (In Russ.)
9. Magiera A. Kuźnia M., Jerzak W. Analysis of the Structural, Chemical, and Mechanical Characteristics of Polyurethane Foam Infused with Waste from Thermal Processing // *Materials*. – 2025. – T. 18.

-
10. Ochigüe P.C.D. et al. Upcycling PVC and PET as Volume-Enhancing Functional Fillers for the Development of High-Performance Bio-Based Rigid Polyurethane Foams // Sustainability. – 2024. – Т. 16.
 11. Polecki K. et al. Polyurethane Recycling: Sustainable Development Perspectives and Innovative Approaches // Materials. – 2026. – Т. 19.
 12. Sapaev I. et al. A Mini-Review on the Studies Done on the Acidification of Carbonate Rock Matrix // Chemical Methodologies. – 2025. – Т. 9.
 13. Selvaraj V.K. et al. Optimized recycling of e-waste and tire rubber into sustainable polyurethane composites with enhanced compressive performance // Scientific Reports. – 2026.

Статья поступила в редакцию: 30.07.2026

Статья принята к публикации: 09.08.2026

Статья опубликована: 28.08.2026

УДК 678.5+691.3

DOI: 10.32743/UniTech.2026.149.8.23291

Исследование влияния антипирена на основе циануровой кислоты и оксидов алюминия-кремния на реологические свойства, кислородный индекс и огнеустойчивость в композитах на основе полиэтилена F-0220

Эсанова Рашида Рахмадович

исследователь, Термезский государственный педагогический институт
Республика Узбекистан, г. Термез

Тураева Хайита Худайназарович
проф.

Термезский государственный университет
Республика Узбекистан, г. Термез

Тожиева Панжи Жовлиевич
д-р техн. наук

доц. Термезский государственный педагогический институт
Республика Узбекистан, г. Термез

Сафаров Азамат Маматали угли

д-р филос. по техн. наукам, Термезский государственный университет
Республика Узбекистан, г. Термез

Равшанова Сожида Сафаровна
студент

направления образования Химия Термезский государственный педагогический институт
Республика Узбекистан, г. Термез

E-mail: azamatsafarov905@gmail.com

A study of the influence of a fire retardant based on cyanuric acid and aluminum-silicon oxides on rheological properties, oxygen index and fire resistance in composites based on polyethylene F-0220

Esanov Rashida Rakhmadovich

Researcher

Termez State Pedagogical Institute

Republic of Uzbekistan, Termez

Turayev Khayit Khudaynazarovich

professor

Termez State University

Republic of Uzbekistan, Termez

Tozhiev Panzhi Zhovlievich

doctor of technical sciences, Associate professor

Termez State Pedagogical Institute

Republic of Uzbekistan, Termez

Safarov Azamat Mamatali ugli

doctor of philosophy in technical sciences, Termez State University

Republic of Uzbekistan, Termez

Ravshanova Sozhida Safarovna

student of the Chemistry education direction

Termez State Pedagogical Institute

Republic of Uzbekistan, Termez

Аннотация

В данной статье представлены результаты экспериментальных исследований влияния антипирена на основе циануровой кислоты и алюмосиликатных оксидов (оксидов алюминия и кремния) на реологические свойства, показатель текучести расплава (СОК), кислородный индекс и огнестойкость композиционных материалов на основе полиэтилена марки F-0220. Композиты С-10–С-50 с различным содержанием наполнителей были получены методом экструзии на двухшнековом экструдере при температурном режиме 160–210°C. Установлено, что введение азотно-фосфорного антипирена на основе циануровой кислоты снижает показатель текучести расплава полиэтилена с 2,3–2,5 до 1,8–1,9 г/10 мин, что создаёт благоприятные реологические условия для введения оксидов алюминия и кремния в высоких концентрациях. Показано, что по мере увеличения доли минеральных наполнителей кислородный индекс композитов возрастает с 20,4 % (чистый ПЭ) до 31,2 % (образец С-50), а продолжительность беспламенного горения отдельных образцов (С-30) достигает 285 секунд. Выявлен синергетический характер взаимодействия антипирена и минеральных оксидов, заключающийся в ограничении подвижности полимерных цепей и формировании теплопоглощающего карбонизированного защитного слоя. Полученные результаты могут быть использованы при разработке новых огнестойких полимерных композиционных материалов с улучшенными технологическими и эксплуатационными свойствами.

Библиографическое описание: Исследование влияния антипирена на основе циануровой кислоты и оксидов алюминия-кремния на реологические свойства, кислородный индекс и огнестойчивость в композитах на основе полиэтилена F-0220 // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Эсанова Р.Р. [и др.]. 2026. 8(149). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23291>

Abstract

This article presents the results of an experimental investigation into the effects of a cyanuric acid-based flame retardant combined with aluminum–silicon oxides on the rheological properties, melt flow index (MFI), limiting oxygen index (LOI), and flame resistance of polyethylene F-0220-based composite materials. Composite samples (S-10–S-50) with varying filler content were prepared by melt compounding on a twin-screw extruder at a temperature range of 160–210°C. It was found that the incorporation of the nitrogen-phosphorus flame retardant based on cyanuric acid reduced the melt flow index of polyethylene from 2.3–2.5 to 1.8–1.9 g/10 min, creating favorable rheological conditions for introducing aluminum and silicon oxides at high concentrations. As the mineral filler content increased, the limiting oxygen index rose from 20.4 % (neat PE) to 31.2 % (sample S-50), while the non-flaming burning duration of certain samples (S-30) reached 285 seconds. A synergistic interaction between the flame retardant and mineral oxides was identified, restricting polymer chain mobility and promoting the formation of a heat-absorbing carbonized protective layer. The obtained results provide a scientific basis for the development of flame-retardant polymer composite materials with improved technological and service properties.

Ключевые слова: полиэтилен F-0220, композит, пиролиз, кислородный индекс, показатель СОК, оксид алюминия, оксид кремния, циануровая кислота.

Keywords: polyethylene F-0220, composite, pyrolysis, oxygen index, MFI (COK) index, aluminum oxide, silicon oxide, cyanuric acid.

Введение

В последние годы вопрос повышения огнестойкости полимерных материалов признаётся одним из приоритетных научных направлений в области материаловедения и полимерной химии. В частности, материалы на основе полиэтилена широко применяются в строительной, электротехнической, транспортной и других отраслях промышленности благодаря низкой плотности, высокой механической прочности, устойчивости к коррозии и химическим воздействиям, а также экономической эффективности. Однако высокая горючесть полиэтилена и его легковоспламеняемость под термическим воздействием существенно ограничивают его эксплуатационные возможности и создают определённые проблемы при обеспечении требований пожарной безопасности.

Поэтому разработка методов модификации, направленных на эффективное улучшение реологических, термофизических и огнестойких свойств полиэтиленовой матрицы, а также научное исследование влияния различных антипиренов и минеральных наполнителей на свойства полимерной композиции имеет актуальное научно-практическое значение.

Антипирены на основе фосфора-азота обладают multifunctionalными механизмами действия при повышении огнестойкости полимерных композитов, замедляя радикальные цепные реакции в газовой фазе и ускоряя формирование защитного слоя за счёт усиления карбонизации в фазе конденсации. В частности, производные циануровой кислоты в определённой степени снижают показатель текучести полиэтилена и повышают вязкость материала, что создаёт благоприятные реологические условия для введения оксидов алюминия и кремния в качестве наполнителя в высоких концентрациях. Увеличение доли

минеральных наполнителей, в свою очередь, способствует формированию в составе композита устойчивого слоя, поглощающего тепло, стимулирующего карбонизацию и ограничивающего распространение огня.

Основной целью настоящего исследования является научный анализ механизмов изменения реологических свойств, теплостойкости и кислородного индекса полиэтиленовых композитов под воздействием антипиренов на основе циануровой кислоты. Задачи исследования включают: изучение огнестойких свойств полимерных композитов, изготовленных на основе полиэтилена Ф-0220 и содержащих различные количества минеральных модификаторов и антипирен на основе циануровой кислоты; анализ механизмов изменения показателя текучести расплава и кислородного индекса на фоне постепенного увеличения доли алюминиево-кремнистой смеси в образцах от С-10 до С-50; выявление синергетических закономерностей взаимодействия антипирена и минеральных оксидов в полиэтиленовой матрице.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования использован полиэтилен марки F-0220, модифицированный антипиреном азотно-фосфорной природы на основе циануровой кислоты и минеральными наполнителями — оксидами алюминия и кремния. Составы исследованных композитов (образцы С-10–С-50) с указанием массовой доли полиэтилена, оксидов алюминия-кремния и антипирена на основе циануровой кислоты приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Составы исследованных композитов (образцы С-10–С-50) с указанием массовой доли полиэтилена, оксидов алюминия-кремния и антипирена на основе циануровой кислоты

№	Тип образца	Полиэтилен F-0220, %	Оксиды алюминия-кремния, %	Антипирен на основе циануровой кислоты, %	СОК (г/10 мин)
1	ПЭ (контроль)	100	0	0	2.1–2.3
2	С-10	90	5	5	2.3
3	С-20	80	10	10	2.2
4	С-30	70	20	10	2.1
5	С-40	60	30	10	2.0
6	С-50	50	40	10	1.9

Показатели СОК композитов с добавлением полиэтилена F-0220 и антипиренов на основе оксидов алюминия и кремния, а также циануровой кислоты определены при температуре 190°C и нагрузке 2,16 кг в соответствии с требованиями ГОСТ 11645-80.

С целью оценки реологических свойств композитов, полученных в присутствии антипиренов на основе полиэтилена, оксидов алюминия и кремния, а также циануровой кислоты, материалы обрабатывались на двухвинтовом экструдере. Выбранный для экструзионного процесса температурный диапазон 160–210°C позволил обеспечить максимально равномерное смешивание компонентов при сохранении термомеханической

стабильности полимера. Оптимальное распределение температуры экструдера по зонам — 160–170°C, 180–190°C и 200–210°C — обеспечивало плавление полимерной матрицы, а модификаторы равномерно распределялись по матрице.

Показатель текучести расплавов (ПТР) определяли на вискозиметре ГТ-МФИ-450 при нагрузке 2,16 кг и температуре 190°C в соответствии с требованиями ГОСТ 11645-73. На основании полученных данных изучалось изменение реологического состояния полиэтиленовой матрицы при введении антипиренов на основе оксидов алюминия и кремния, а также циануровой кислоты азотно-фосфорной природы.

Физико-геометрические показатели (рост, ширина, толщина, масса) и огнестойкие характеристики (продолжительность горения, кислородный индекс) образцов, изготовленных на основе чистого полиэтилена (контроль) и композиций С-10–С-50 с поэтапно сниженной долей полимера и увеличенным количеством минеральных наполнителей, приведены в таблице 2.

Результаты и обсуждение

Реологические свойства композитов. Результаты исследований показали, что для неочищенного ПЭ Ф-0220 СОК составляет около 2,1–2,3 г/10 мин, а с введением дополнительных компонентов вязкость раствора снижается. Это состояние последовательно проявлялось в композитах от образца С-10 до образца С-50, при этом отмечалось снижение значений СОК с 2,3 до 1,9 г/10 мин (таблица 1). Последовательное снижение значений СОК связано с тем, что антипирены и минеральные наполнители ограничивают макромолекулярное движение в полиэтиленовой матрице. Особенно ярко замедляющее действие сегментарного движения азотно-фосфорных антипиренов проявляется в композитах с долей полиэтилена менее 70 %. В результате увеличивается вязкость раствора и снижается текучесть, что создаёт преимущество при технологической переработке композитов с высоким содержанием наполнителя.

Отмечено, что в результате воздействия азота и фосфора в составе антипирена на полимерные цепи реологическая подвижность полиэтилена снижается, а молекулярная динамика замедляется. Это облегчило равномерное проникновение наполнителей в полимерную матрицу в больших количествах на этапе экструзии. Оксиды алюминия и кремния, в свою очередь, нормализовали общую плавкость системы и способствовали стабильному распределению твёрдой фазы в составе композита. Снижение коэффициента текучести имеет технологически важное значение: доведение доли наполнителей до 30–40 % в образцах С-40 и С-50, имеющих самые низкие реологические показатели, стало возможным без нарушения стабильности экструзионного процесса. Эта тенденция расширяет возможности получения высокоминерально-модифицированных композитов, значительно повышая их стойкость к истиранию, термическому воздействию и горючести.

Кислородный индекс и огнестойкость композитов. Результаты экспериментальных исследований подтвердили, что изменение состава композиции оказывает значительное влияние на значения кислородного индекса (таблица 2). При кислородном индексе 20,4 % (по другим измерениям — 19,4 %) в чистом полиэтилене, в результате добавления антипирена и минеральных оксидов этот показатель увеличился до 25 % в образце С-1, до 26,1 % в образце С-20, до 28,2 % в образце С-30. Самые высокие значения отмечены в образцах С-40

и С-50 и составили 30,3 % и 31,2 % соответственно. Данная тенденция объясняется свойствами оксидов алюминия и кремния стимулировать карбонизацию и ограничивать теплоотдачу.

Таблица 2.

Кислородный индекс и огнестойкость композитов

№	Процент	Рост, см	Ширина, см	Толщина, см	Масса, г	Время, с	Кислородный индекс, %
ПЭ	100%	3.5	2.5	0.4	2.74	179	19.4
S-10	90%	3.7	2.8	0.4	2.94	153.6	25
S-20	80%	3.9	2	0.4	2.9	238.8	26.1
S-30	70%	3.4	2.7	0.4	3	285	28.2
S-40	60%	3.5	2.2	0.4	2.89	185	30.3
S-50	50%	3.7	2.7	0.4	2.8	121	31.2

Изменение доли состава образцов композитов на основе полиэтилена и изменение показателей кислородного индекса

Показатели времени горения композитов также существенно зависят от изменения состава: некоторые образцы (в частности, С-30) продемонстрировали высокую огнестойкость, продержавшись без горения до 285 секунд. Небольшие различия в геометрических размерах образцов определяются реологическими изменениями на стадии их формирования, что напрямую связано с влиянием антипиренов на текучесть полиэтилена. Высокая доля минеральных наполнителей способствует формированию в полимерной матрице защитного слоя, замедляющего тепловой поток, в результате чего скорость окисления резко снижается.

Наблюдения показали, что хотя с увеличением доли наполнителей масса композита стала относительно стабильной, степень огнестойкости и сопротивления процессу окисления значительно возросла. Также зависимость между продолжительностью горения и массой образцов выявила влияние элементов состава на теплоустойчивость.

Таким образом, полученные результаты показали, что реологические и огнестойкие изменения в системе полиэтилен–антипирен–минеральный наполнитель имеют синергетический характер взаимодействия компонентов. Азотно-фосфорные антипирены ограничивают подвижность полимерных цепей и позволяют вводить в полимерную матрицу большое количество наполнителей; минеральные оксиды алюминия и кремния оказывают стабилизирующий эффект на текучесть и одновременно стимулируют карбонизацию, ограничивая теплоотдачу. Азотно-фосфорные антипирены не только активируют реакции радикального захвата в газовой фазе, но и стабилизируют продукты неполного разложения полимера в фазе конденсации, ускоряя образование защитного слоя. Такое комплексное взаимодействие является важным фактором оптимизации технологических процессов получения высокоогнестойких композитов и повышения их эксплуатационных свойств.

Заключение

В результате проведённых исследований установлено, что комплексное введение в состав полиэтилена Ф-0220 азотно-фосфорного антипирена на основе циануровой кислоты и минеральных наполнителей (оксидов алюминия и кремния) оказывает существенное влияние на реологические, теплофизические и огнестойкие свойства получаемых композитов.

Показано, что наличие элементов азота и фосфора в составе антипирена значительно снижает показатель текучести расплава полиэтилена — с исходных значений 2,3–2,5 г/10 мин до 1,8–1,9 г/10 мин. Данное реологическое изменение повышает вязкость полимерной матрицы и создаёт технологические условия для введения повышенного количества минеральных наполнителей без нарушения стабильности экструзионного процесса.

Установлено, что по мере уменьшения доли полимера и увеличения доли наполнителей кислородный индекс композитов возрастает с 20,4 % до 31,2 %, что свидетельствует о значительном повышении их огнестойкости в результате синергического взаимодействия антипирена и минеральных оксидов; продолжительность беспламенного горения отдельных образцов (С-30) достигает 285 секунд.

Таким образом, комплексное применение азотно-фосфорных антипиренов на основе циануровой кислоты и минеральных наполнителей в композитах на основе полиэтилена Ф-0220 представляет собой эффективную стратегию повышения огнестойкости при сохранении технологичности переработки. Полученные научные выводы имеют практическое значение для формирования высоконаполненных композиций и управления их функциональными свойствами при разработке огнеупорных полимерных материалов на основе термопластов, а также при выборе оптимального состава и совершенствовании технологических процессов производства полимерных материалов с высоким кислородным индексом.

Список литературы

1. Chambhare S.U., Lokhande G.P., Jagtap R.N. UV-curable behavior of phosphorus- and nitrogen-based reactive diluent for epoxy acrylate oligomer used for flame-retardant wood coating // J. Coatings Technol. Res. – 2016. – Т. 13, № 4.
2. Dou J., Xie Y., Chen R., Qin Y. Study on the Dispersion and Processing Performance of Activated Aluminum Hydroxide/Ammonium Polyphosphate Composite Flame Retardant System for Vinyl Ester Resin // Polymers. – 2025. – Т. 17, № 5.
3. Gou T. et al. Novel phosphorus/nitrogen-rich oligomer with numerous reactive groups for durable flame-retardant cotton fabric // Cellulose. – 2021. – Т. 28, № 11.
4. Guo C., Zhao Y., Ji G., Wang C., Peng Z. Organic Aluminum Hypophosphite/Graphitic Carbon Nitride Hybrids as Halogen-Free Flame Retardants for Polyamide 6 // Polymers. – 2020. – Т. 12, № 10.
5. Howell B.A., Dumitrascu A. Thermal and combustion characteristics of phosphorus and phosphorus/nitrogen-containing styrene monomers and oligomers // J. Therm. Anal. Calorim. – 2012. – Т. 109, № 3.

6. Kablov V.F. et al. Development of phosphorus-boron-nitrogen-containing modifier for elastomeric compositions // Polym. Sci. Ser. D. – 2016. – Т. 9, № 2.
7. Zhang D., Lei L., Shang Y. Phosphorus and nitrogen dual doped ordered mesoporous carbon with tunable pore size for supercapacitors // J. Mater. Sci. Mater. Electron. – 2015. – Т. 27, № 4.
8. Zhang Z., Yang M., Cai K., Chen Y., Liu S., Liu W., Liu J. Effect of the Flame Retardants and Glass Fiber on the Polyamide 66/Polyphenylene Oxide Composites // Materials. – 2022. – Т. 15, № 3.
9. Zhang J., Yan W., Huang W. et al. Construction of Fire-Retardant PEO Composite Based on Calcium Sulfate Whiskers Fabricated from Phosphogypsum and DOPO Derivatives // Polymers. – 2025. – Т. 17, № 12. – DOI: 10.3390/polym17121588.
10. Zhang, D. Flame retardancy properties and rheological behavior of PP/DiDOPO conjugated flame retardant composites / D. Zhang, X. Shang, J. Luo [et al.] // Frontiers in Chemistry. – 2022. – Т. 10.

НЕФТЯНАЯ И ГАЗОВАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ. ПЕРЕРАБОТКА УГЛЕВОДОРОДНОГО СЫРЬЯ

Статья поступила в редакцию: 05.08.2026

Статья принята к публикации: 20.08.2026

Статья опубликована: 28.08.2026

УДК 622.276.5+519.6

Моделирование и оптимизация параметров солянокислотной обработки геологически неоднородных карбонатных коллекторов

Саматов Шерзод Шавкатович

базовый докторант

Каршинский государственный технический университет

Республика Узбекистан, г. Карши

ORCID: 0009-0007-2995-6478

E-mail: sh.sh.samatov@gmail.com

Бойкабилова Махлиё Махмудовна

базовый докторант

Каршинский государственный технический университет

Республика Узбекистан, г. Карши

ORCID: 0009-0008-7613-8547

E-mail: mahliyoboyqobilova@gmail.com

Modeling and optimization of hydrochloric acid treatment parameters for geologically heterogeneous carbonate reservoirs

Samatov Sherzod Shavkatovich

PhD candidate

Karshi State Technical University

Uzbekistan, Karshi

Boyqobilova Mahliyo Makhmudovna

PhD candidate

Karshi State Technical University

Uzbekistan, Karshi

Аннотация

Целью исследования является определение эффективной скорости закачки 15 %-ного раствора соляной кислоты в геологически неоднородный карбонатный коллектор. Разработанная реактивно-фильтрационная модель учитывает течение кислотного раствора по закону Дарси, конвективно-дисперсионный перенос HCl, реакцию кислоты с кальцитом, изменение пористости и нелинейную эволюцию проницаемости. Пространственная

Библиографическое описание: Саматов Ш.Ш., Бойкабилова М.М. Моделирование и оптимизация параметров солянокислотной обработки геологически неоднородных карбонатных коллекторов // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 8(149). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23328>

неоднородность начальной пористости задана коррелированным случайным полем с коэффициентом вариации $C_v^{\varphi} = 0,10$. Исследованы скорости закачки от 0,01 до 20,0 см/мин. Установлено, что при малых скоростях преобладает поверхностное растворение, а при чрезмерно высоких – объёмное растворение с повышенным расходом кислоты. Наиболее эффективный режим получен при $u_0 = 0,8$ см/мин и числе Дамкёлера $Da = 19,2$. Безразмерный объём кислоты до прорыва составил $PV_{bt} = 3,1$, а отношение макроскопической проницаемости K_{final}/K_0 превысило 120. По сравнению с поверхностным растворением расход кислоты уменьшился на 93,1 %. Предложенный интегральный индекс позволяет совместно оценивать расход реагента и изменение проницаемости. Результаты могут применяться для предварительного выбора режима матричной кислотной обработки с последующей калибровкой по керновым и промысловым данным.

Abstract

The study aims to determine an effective injection rate for a 15 wt.% hydrochloric acid solution in a geologically heterogeneous carbonate reservoir. The developed reactive-transport model incorporates Darcy flow, convective-dispersive HCl transport, acid-calcite reaction, porosity evolution, and nonlinear permeability alteration. The spatial heterogeneity of the initial porosity is represented by a correlated random field with a coefficient of variation of $C_v^{\varphi} = 0.10$. Injection rates ranging from 0.01 to 20.0 cm/min were investigated. At low injection rates, acid was consumed near the inlet, resulting in face dissolution, whereas excessively high rates promoted volumetric dissolution and increased acid consumption. The most effective regime was obtained at $u_0 = 0.8$ cm/min and a Damköhler number of $Da = 19.2$. Under these conditions, the dimensionless acid volume to breakthrough was $PV_{bt} = 3.1$, while the macroscopic permeability ratio K_{final}/K_0 exceeded 120. Compared with the face-dissolution regime, acid consumption decreased by 93.1 %. The proposed integral index enables a combined evaluation of acid consumption and permeability improvement. The results can be applied to the preliminary selection of matrix-acidizing regimes, followed by calibration using core-flooding experiments and field data.

Ключевые слова: карбонатный коллектор, геологическая неоднородность, солянокислотная обработка, реактивная фильтрация, червеобразный канал, число Дамкёлера, оптимизация.

Keywords: carbonate reservoir, geological heterogeneity, hydrochloric acid treatment, reactive transport, wormhole, Damköhler number, optimization.

Введение

Карбонатные коллекторы характеризуются сложной структурой порового пространства, сформированной первичной пористостью, вторичным растворением, доломитизацией, трещиноватостью и кавернозностью. Поэтому распределение кислоты определяется не только средними петрофизическими параметрами, но и пространственной связанностью локальных высокопроницаемых участков [6, 7, 9, 10].

Матричная солянокислотная обработка применяется для снижения фильтрационного сопротивления призабойной зоны карбонатного коллектора. При взаимодействии HCl с минеральной матрицей формируются высокопроницаемые червеобразные каналы. Их морфология зависит от соотношения скоростей химической реакции, конвективного переноса и дисперсии кислоты [2, 4, 5, 9].

При слишком малой скорости закачки кислота расходуется вблизи входной поверхности, вызывая поверхностное растворение. При чрезмерно высокой скорости уменьшается время контакта реагента с породой и усиливается объёмное растворение. В обоих случаях возрастает объём кислоты, необходимый для прорыва. Оптимальный режим обычно формируется в промежуточном диапазоне скоростей [4, 5, 8, 9].

Современные исследования подтверждают, что естественные трещины, неоднородность порового пространства и геометрия фильтрационного потока могут изменять направление каналов, степень их разветвления и величину PV_{bt} [3, 7, 8, 10]. В предыдущей работе с участием авторов рассмотрены результаты кислотной обработки на примере месторождений Матонат и Западный Крук [1]. В настоящем исследовании основное внимание уделено совместной оценке морфологии растворения, расхода кислоты и изменения макроскопической проницаемости.

Цель исследования – определить эффективную скорость закачки 15 %-ного раствора HCl в модели геологически неоднородного карбонатного коллектора.

Материалы и методы

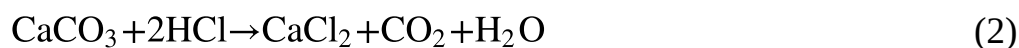
В качестве расчётного объекта принят двумерный фрагмент карбонатного коллектора размером $6,5 \times 3,0$ см. Начальная средняя пористость составляла $\bar{\varphi}_0 = 0,15$, проницаемость – $K_0 = 10$ мД, температура – 80°C . Расчётная область разделена на 260×120 ячеек.

Пространственная неоднородность задавалась коррелированным полем начальной пористости. Степень неоднородности характеризовалась коэффициентом вариации:

$$C_v^\varphi = \frac{\sigma_\varphi}{\bar{\varphi}_0} \quad (1)$$

При $\sigma_\varphi = 0,015$ и $\bar{\varphi}_0 = 0,15$ получено $C_v^\varphi = 0,10$, что соответствует умеренной неоднородности.

Реакция HCl с кальцитом описывалась уравнением:



Движение кислотного раствора определялось законом Дарси:

$$u = \frac{K(\varphi)}{\mu} \nabla p, \quad (3)$$

где u – скорость фильтрации; $K(\varphi)$ – текущая проницаемость; μ – динамическая вязкость раствора; p – давление.

Перенос и расходование кислоты описывались уравнением [5, 6, 9]:

$$\frac{\partial(\varphi C^f)}{\partial t} + \nabla \cdot (u C^f) \nabla \cdot (\varphi D_e \nabla C^f) k_{\text{eff}} a_v C^f, \quad (4)$$

где C^f – концентрация HCl; D_e – коэффициент дисперсии; k_{eff} – эффективный коэффициент реакции; a_v – удельная реакционная поверхность.

Изменение пористости вследствие растворения кальцита рассчитывалось как:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} \cdot \frac{\alpha M_{\text{CaCO}_3}}{\rho_s} k_{\text{eff}} a_v C^f, \quad (5)$$

где $\alpha = 0,5$ моль CaCO_3 /моль HCl; M_{CaCO_3} – молярная масса кальцита; ρ_s – плотность минеральной матрицы.

Проницаемость пересчитывалась по модифицированной зависимости Кармана-Козени:

$$\frac{K(\varphi)}{K_0} \left(\frac{\varphi}{\varphi_0} \right)^3 \left(\frac{1-\varphi_0}{1-\varphi} \right)^2 \quad (6)$$

На входной границе задавались скорость закачки u_0 и постоянная концентрация кислоты. На выходной границе принималось постоянное давление, а на боковых границах – отсутствие нормального потока. Момент прорыва определялся при достижении кислотой выходной границы модели.

Число Дамкёлера и безразмерный объём кислоты до прорыва определялись выражениями:

$$Da = \frac{k_{\text{eff}} a_0 L}{u_0}; PV_{bt} = \frac{u_0 t_{bt}}{\varphi_0 L} \quad (7)$$

Для совместной оценки расхода кислоты и фильтрационного результата использован индекс:

Таблица 1.

Параметры базовой модели

Параметр	Обозначение	Значение
Размер модели, см	$L \times B$	6,5×3,0
Расчётная сетка	–	260×120
Средняя пористость	$\bar{\varphi}_0$	0,15
Коэффициент вариации	C_v^φ	0,10
Начальная проницаемость, мД	K_0	10
Концентрация HCl, масс. %	C_0	15
Температура, °C	T	80
Вязкость раствора, мПа·с	μ	1,2
Коэффициент реакции, м/с	k_{eff}	$1,6 \cdot 10^{-6}$
Удельная поверхность, 1/м	a_0	$2,46 \cdot 10^4$

Расчёты выполнены при скоростях закачки 0,01; 0,10; 0,80; 2,00; 5,00 и 20,00 см/мин.

Результаты и обсуждение

При изменении скорости закачки выявлены пять режимов: поверхностное растворение, конусообразные каналы, доминирующий канал, разветвлённые каналы и объёмное растворение (Рис.1). Последовательность режимов определяется изменением соотношения между скоростью реакции и переносом кислоты [2, 4 – 6, 9].

При $u_0 = 0,01$ см/мин и $Da = 1540,5$ реакция значительно преобладала над переносом. Кислота расходовалась у входной границы, поэтому $PV_{bt} = 45,2$, а проницаемость увеличилась только в 1,2 раза.

При скорости 0,10 см/мин кислота проникала глубже, однако растворение ограничивалось короткими конусообразными каналами. Значение PV_{bt} снизилось до 18,5, а K_{final}/K_0 увеличилось до 8,5.

Наиболее эффективный режим получен при $u_0 = 0,8$ см/мин и $Da = 19,2$. В этом случае сформировался один доминирующий канал, пересекающий расчётную область. Локальный рост проницаемости усиливал приток кислоты, что ускоряло дальнейшее растворение. Значение PV_{bt} уменьшилось до 3,1, а K_{final}/K_0 превысило 120 (Табл.2)

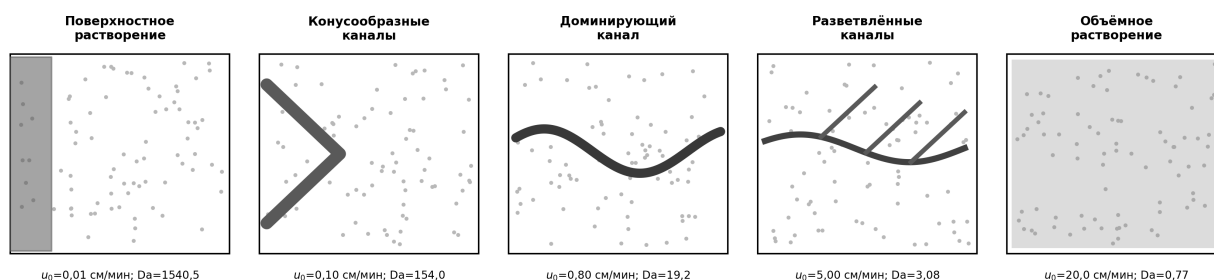


Рисунок 1. Режимы растворения при различных скоростях закачки HCl

Таблица 2.

Результаты расчётов при различных скоростях закачки HCl

u_0 , см/мин	Da	PV_{bt}	Режим растворения	K_{final}/K_0	I_e
0,01	1540,50	45,2	Поверхностное	1,2	0,00
0,10	154,00	18,5	Конусообразные каналы	8,5	0,41
0,80	19,20	3,1	Доминирующий канал	>120,0	>38,39
2,00	7,70	5,2	Частично разветвлённые	85,4	16,23
5,00	3,08	7,8	Разветвлённые каналы	45,3	5,68
20,00	0,77	22,4	Объёмное растворение	5,1	0,18

По сравнению с поверхностным растворением относительное уменьшение расхода кислоты составило:

$$\frac{45,2 - 3,1}{45,2} \cdot 100\% = 93,1\%.$$

При увеличении скорости до 2,0 и 5,0 см/мин поток распределялся между несколькими ответвлениями, вследствие чего PV_{bt} возросло соответственно до 5,2 и 7,8. При 20,0 см/мин значение $Da = 0,77$ указывало на преобладание конвекции. Устойчивый селективный канал не формировался, а PV_{bt} увеличилось до 22,4

Зависимость PV_{bt} от скорости закачки имеет U-образный характер. Минимум PV_{bt} , максимум K_{final}/K_0 и наибольшее значение I_e соответствуют скорости 0,8 см/мин. Индекс $I_e > 38,39$ в данном режиме более чем в 2,36 раза превышает показатель варианта при 2,0 см/мин (Рис.2).

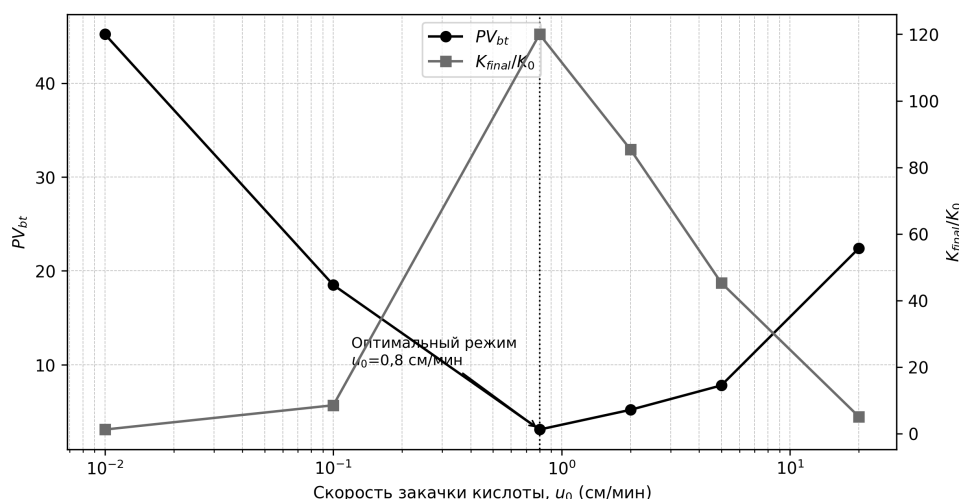


Рисунок 2. Зависимость PV_{bt} и K_{final}/K_0 от скорости закачки HCl

Полученный оптимум относится только к принятой модели: 15 %-ному HCl, температуре 80 °C, пористости 0,15, проницаемости 10 мД и $C_v^p = 0,10$. При изменении температуры, минералогического состава, концентрации кислоты или геологической неоднородности оптимальная скорость может сместиться [3, 7, 8, 10].

Промысловое сопоставление по скважинам Матонат-24 и Западный Крук-85 показало увеличение исходных показателей дебита соответственно на 41,6 и 99,6 % [1]. Эти данные подтверждают практическую направленность метода, но не являются прямой верификацией модели, поскольку сведения о минералогическом составе, объёме кислоты, графике закачки и начальном скин-факторе представлены не в полностью сопоставимом виде.

Основными ограничениями исследования являются использование одной реализации неоднородного поля, одной концентрации HCl и двумерной геометрии. Модель не учитывает отдельное движение CO_2 , механическую деформацию породы и тепловой эффект реакции.

Заключение

1. Скорость закачки HCl определяет соотношение между реакцией и переносом кислоты и влияет на морфологию растворения карбонатного коллектора.
2. При малых скоростях наблюдается поверхностное растворение, а при чрезмерно высоких – объёмное растворение с повышенным расходом кислоты.
3. Для модели с $C_v^p = 0,10$, $\varphi_0 = 0,15$, $K_0 = 10$ мД, температурой 80 °C и 15 %-ным HCl наиболее эффективный режим получен при $u_0 = 0,8$ см/мин и $Da = 19,2$.

4. В оптимальном режиме $PV_{bt} = 3, 1$, а $K_{final}/K_0 > 120$. По сравнению с поверхностным растворением расход кислоты уменьшился на 93,1 %.

5. Предложенный индекс I_e позволяет совместно оценивать расход кислоты и изменение проницаемости. Перед применением результатов к конкретной скважине модель должна быть откалибрована по керновым и промысловым данным.

Список литературы

1. Эрматов Н.Х., Саматов Ш.Ш., Бойкабилова М.М., Ахатова Г.А. Karbonat kollektorlarga kislotali ishlov berishni modellashtirish (Matonat va G'arbiy Kruk konlari misolida) // Innovatsion texnologiyalar. – 2025. – № 3. – P. 7–15.
2. Buijse M.A., Glasbergen G. A Semi-Empirical Model to Calculate Wormhole Growth in Carbonate Acidizing // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – 2005. – DOI: 10.2118/96892-MS.
3. Dudun A., Feng Y. Numerical Simulation of Wormhole Propagation in Fractured Carbonate Rocks During Acidizing Using a Simplified Stokes-Brinkman Model // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. – 2024. – DOI: 10.1007/s13202-024-01857-w.
4. Fredd C.N., Fogler H.S. Influence of Transport and Reaction on Wormhole Formation in Porous Media // AIChE Journal. – 1949. – № 9. – DOI: 10.1002/aic.690440902.
5. Kalia N., Balakotaiah V. Modeling and Analysis of Wormhole Formation in Reactive Dissolution of Carbonate Rocks // Chemical Engineering Science. – 2007. – № 4. – DOI: 10.1016/j.ces.2006.10.021.
6. Kalia N., Balakotaiah V. Effect of Medium Heterogeneities on Reactive Dissolution of Carbonates // Chemical Engineering Science. – 2009. – № 2. – DOI: 10.1016/j.ces.2008.10.026.
7. Liu P., Kong X., Feng G., Zhang K., Sun S., Yao J. Three-Dimensional Simulation of Wormhole Propagation in Fractured-Vuggy Carbonate Rocks During Acidization // Advances in Geo-Energy Research. – 2023. – № 3. – DOI: 10.46690/ager.2023.03.06.
8. Lucas C.R. dos Santos, Neyra J.R., Araújo E.A., da Silva D.N.N., Lima M.A., Ribeiro D.A.M., Aum P.T.P. Carbonate Acidizing: A Review on Influencing Parameters of Wormholes Formation // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2023. – DOI: 10.1016/j.petrol.2022.111168.
9. Panga M.K.R., Ziauddin M., Balakotaiah V. Two-Scale Continuum Model for Simulation of Wormholes in Carbonate Acidization // AIChE Journal. – 2005. – № 12. – DOI: 10.1002/aic.10574.
10. Yang G., Wu X., Hou J., Nie F. Study on the Influence of Heterogeneity of Low-Permeability Reservoirs on Wormhole Morphology and Acidizing Process Parameters // Processes. – 2024. – № 12. – DOI: 10.3390/pr12122740.

References

1. Ermatov N.Kh., Samatov Sh.Sh., Boykobilova M.M., Akhatova G.A. [Modeling Acid Treatment of Carbonate Reservoirs: A Case Study of the Matonat and Western Kruk Fields] // *Innovatsion tekhnologiyalar.* – 2025. – № 3.
2. Buijse M.A., Glasbergen G. A Semi-Empirical Model to Calculate Wormhole Growth in Carbonate Acidizing // *SPE Annual Technical Conference and Exhibition.* – 2005. – DOI: 10.2118/96892-MS.
3. Dudun A., Feng Y. Numerical Simulation of Wormhole Propagation in Fractured Carbonate Rocks During Acidizing Using a Simplified Stokes-Brinkman Model // *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology.* – 2024. – DOI: 10.1007/s13202-024-01857-w.
4. Fredd C.N., Fogler H.S. Influence of Transport and Reaction on Wormhole Formation in Porous Media // *AIChE Journal.* – 1949. – № 9. – DOI: 10.1002/aic.690440902.
5. Kalia N., Balakotaiah V. Modeling and Analysis of Wormhole Formation in Reactive Dissolution of Carbonate Rocks // *Chemical Engineering Science.* – 2007. – № 4. – DOI: 10.1016/j.ces.2006.10.021.
6. Kalia N., Balakotaiah V. Effect of Medium Heterogeneities on Reactive Dissolution of Carbonates // *Chemical Engineering Science.* – 2009. – № 2. – DOI: 10.1016/j.ces.2008.10.026.
7. Liu P., Kong X., Feng G., Zhang K., Sun S., Yao J. Three-Dimensional Simulation of Wormhole Propagation in Fractured-Vuggy Carbonate Rocks During Acidization // *Advances in Geo-Energy Research.* – 2023. – № 3. – DOI: 10.46690/ager.2023.03.06.
8. Lucas C.R. dos Santos, Neyra J.R., Araújo E.A., da Silva D.N.N., Lima M.A., Ribeiro D.A.M., Aum P.T.P. Carbonate Acidizing: A Review on Influencing Parameters of Wormholes Formation // *Journal of Petroleum Science and Engineering.* – 2023. – DOI: 10.1016/j.petrol.2022.111168.
9. Panga M.K.R., Ziauddin M., Balakotaiah V. Two-Scale Continuum Model for Simulation of Wormholes in Carbonate Acidization // *AIChE Journal.* – 2005. – № 12. – DOI: 10.1002/aic.10574.
10. Yang G., Wu X., Hou J., Nie F. Study on the Influence of Heterogeneity of Low-Permeability Reservoirs on Wormhole Morphology and Acidizing Process Parameters // *Processes.* – 2024. – № 12. – DOI: 10.3390/pr12122740.

UNIVERSUM: ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Электронный научный журнал

№ 8(149)

Август 2026 г.

Часть 3

Свидетельство о регистрации СМИ: ЭЛ № ФС 77 – 54434 от 17.06.2013

Мнение авторов может не совпадать с позицией редакции.

Издание содержит научную информацию и в соответствии с ч. 4 ст. 1
Федерального закона от 29.12.2010 № 436-ФЗ «О защите детей от информации,
причиняющей вред их здоровью и развитию» не подлежит классификации
(маркировке) по возрастным категориям

Издательство ООО «Юниверсум»

Объём издания: 80 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: 28.08.2026

Журнал размещается в:

CYBERLENINKA

e НАУЧНАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ
БИБЛИОТЕКА
LIBRARY.RU

Google
scholar

ULRICHSWEB
GLOBAL SERIALS DIRECTORY

>BASE

СОЦИОНЕТ

OpenAIRE



Registry of Open Access
Repositories (ROAR)