

7universum.com
UNIVERSUM:
 ХИМИЯ И БИОЛОГИЯ

9(147)

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Луис Федерико Лелуар (исп. Luis Federico Leloir) (6 сентября 1906, Париж — 2 сентября 1987, Буэнос-Айрес) — аргентинский врач и биохимик, первый аргентинец, получивший Нобелевскую премию по химии.

Окончил университет Буэнос-Айреса (1932). В 1934—1935, 1937—1943 годах работал в Институте физиологии при этом университете (с 1941 года профессор физиологии). В 1936 году в биохимической лаборатории Кембриджского университета. В 1943 году переехал в США. Работал в Вашингтонском (1944) и Колумбийском университетах (1944—1945). В 1946 году вернулся в Аргентину. С 1946 года заведующий биохимической лабораторией Института физиологии.

Член Национальной академии наук США (1960)[2], Американской академии искусств и наук (1961), Лондонского королевского общества (1972)[3], АН Аргентины. Лелуар был известен своей скромностью, сосредоточенностью и последовательностью, многие описывали его как «истинного монаха от науки»[4]. Труды по метаболизму углеводов в живых клетках, а также углеводов производных нуклеотидов. Лелуар и его коллеги изучали гликопротеины, показали основные пути метаболизма галактозы, а также пути развития галактоземии — причины появления невосприимчивости к лактозе. Совместно с группой сотрудников выделил и изучил многие ферменты углеводного обмена. Второго декабря 1970 года Лелуар получил Нобелевскую премию по химии за исследования в области метаболических путей лактозы. Премия размером 80 000 долларов. Лелуар потратил на исследования.



*120 ЛЕТ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ
 6 сентября 2026 г.*

ЛЕЛУАР
 ЛУИС ФЕДЕРИКО
 1906-1987 гг.



UNIVERSUM: ХИМИЯ И БИОЛОГИЯ

Научный журнал

Издается ежемесячно с ноября 2013 года

Выпуск: 9(147)

Сентябрь 2026 г.

Часть 1

Новосибирск
2026

ББК 24+28

U55

Главный редактор журнала:

Кван Ольга Вилориевна – д-р биол. наук.

Редакционная коллегия:

Арестова Инесса Юрьевна – канд. биол. наук;

Аронбаев Сергей Дмитриевич – д-р хим. наук, проф.;

Баженова Ольга Прокопьевна – д-р биол. наук, проф.;

Гилёв Алексей Валерьевич – д-р биол. наук;

Даминова Шахло Шариповна – д-р хим. наук, проф.;

Жаркова Наталья Николаевна – д-р с.-х. наук, доц.;

Жуманиязов Максуд Жаббиевич – д-р техн. наук, проф.;

Кадырова Гульчехра Хакимовна – д-р биол. наук;

Комарова Людмила Николаевна – д-р биол. наук, проф.;

Кунавина Елена Александровна – канд. хим. наук, доц.;

Ларионов Максим Викторович – д-р биол. наук;

Радкевич Мария Викторовна – д-р техн. наук, проф.;

Рудаков Олег Борисович – д-р хим. наук, проф.;

Севостьянова Ольга Игоревна – канд. биол. наук, доц.;

Скоркина Марина Юрьевна – д-р биол. наук, доц.;

Ткачева Татьяна Александровна – канд. хим. наук;

Шахова Валерия Николаевна – д-р биол. наук, доц.;

Шейда Елена Владимировна – д-р биол. наук;

Яковлев Иван Геннадиевич – канд. хим. наук.

U55 Universum: химия и биология : электронный научный журнал. — № 9(147). — Часть 1. — Новосибирск : Изд-во «Юниверсум», 2026. — 88 с. — Текст : электронный. — URL: <https://7universum.com/ru/nature/archive/category/9147> (дата публикации: 07.09.2026).

ISSN 2311-5459

DOI: 10.32743/UniChem.2026.147.9

Учредитель и издатель: ООО «Юниверсум»

© ООО «Юниверсум», 2026 г.

Содержание

Статьи на русском языке

Химия

Неорганическая и аналитическая химия

- Синтез NaL цеолита на основе алюмосиликатного сырья** 5
Абдурахмонов Элдор Баратович
Турабов Баходир Аликул угли
Худайбергенов Мансур Сабурович
- Влияние параметров кислотной активации глинистых сорбентов на эффективность очистки компрессорных масел** 13
Жалилов Шерали Некбоевич
Уринов Олим Исломович
Рамазонова Зухро Ёрбоевна
Султанов Шавкат Абдуллаевич
- Получение микропористых адсорбентов из местного каолина Султунувайс гидротермальным методом (на основании обзора литературы)** 24
Султанов Мирибек Жаббарбергенович
Джуманова Зияда Кеунимжаевна
- Физико-химические и минералогические свойства нефтяного шлама и возможность его применения в керамическом производстве** 32
Хокимов Абдулазиз Эргашали угли
Эминов Ашраф Мамурович
Хамдамова Шохидат Шерзодовна
Мирсалимова Саодат Рахматжановна
Мирзаев Наврузбек Абдуллаевич

Органическая химия

- Фотоинициированный синтез пропилового тиовинолового эфира на основе 1-гексина** 42
Эркинов Расулжон Бахтиёр угли
Солиев Махаммаджон Исматуллаевич
Нурманов Сувонкул Эрхонович

Биоорганическая химия

- Определение содержания водорастворимых витаминов в семенах томатов методом высокоэффективной жидкостной хроматографии** 49
Худжакулов Ахтам Пардабоевич
Аскарлов Ибрагим Рахмонович
Исламов Акмал Хушвакович
- Состав и содержание микро- и макроэлементов в надземной и подземной частях растения *Aconitum talassicum*** 59
Эшматов Жасурбек Муродович
Жалолов Икболжон Жамолович
Турсунов Жахонгир Исроилович
Шергазиев Киличбек Маруфжон угли

Химия высокомолекулярных соединений и полимеры

- Совершенствование технологии изготовления силиконовых форм на основе аддитивного производства и эпоксидной модификации поверхности мастер-модели** 70
Музычук Евгений Геннадьевич

СТАТЬИ НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ

ХИМИЯ

НЕОРГАНИЧЕСКАЯ И АНАЛИТИЧЕСКАЯ ХИМИЯ

Статья поступила в редакцию: 07.08.2026

Статья принята к публикации: 14.08.2026

Статья опубликована: 07.09.2026

УДК 546.11+549.67+661.183

DOI: 10.32743/UniChem.2026.147.9.23317

Синтез NaL цеолита на основе алюмосиликатного сырья

Абдурахмонов Элдор Баратович

д-р хим. наук, Термезский государственный педагогический институт

Республика Узбекистан, г. Термез

E-mail: eldor011085@gmail.com

Турабов Баходир Аликул угли

ассистент-преподаватель

Андижанский государственный технический институт

Республика Узбекистан, г. Андижан

E-mail: bahodir01011992@gmail.com

Худайбергенов Мансур Сабуирович

PhD, доц.

Чирчикский государственный педагогический университет

Республика Узбекистан, г. Чирчик

E-mail: turabovbahodir99@gmail.com

Synthesis of NaL zeolite based on aluminosilicate raw materials

Abdurakhmonov Eldor Baratovich

doctor of Chemical Sciences

Termez State Pedagogical Institute

Republic of Uzbekistan, Termez

Bahodir Aliqul ugli Turabov

Assistant, Lecturer

Andijan State Technical Institute

Republic of Uzbekistan, Andijan

Khudayberganov Mansur Saburovich

PhD, Associate Professor

Chirchik State Pedagogical University

Republic of Uzbekistan, Chirchik

Аннотация

В статье представлены результаты получения цеолита NaL гидротермальным методом с использованием алюмосиликатного сырья. В качестве исходного алюмосиликатного компонента использовали каолин, предварительно переведённый в метакаолин посредством термической активации, а дополнительным источником кремния служило жидкое стекло. Рассмотрена последовательность подготовки сырья, формирования реакционной смеси и гидротермальной кристаллизации. Согласно технологической схеме, исходные компоненты после предварительной щелочной обработки смешивали с метакаолином и жидким стеклом, после чего реакционную смесь подвергали гидротермальной обработке при 160–175 °С в течение 48 часов. Полученный твёрдый продукт отделяли фильтрованием и прокаливали при 450 °С в течение 12 часов. Для оценки структурных особенностей синтезированного материала использовали ИК-спектроскопию и рентгенофазовый анализ. ИК-спектр характеризуется полосами, связанными с колебаниями гидроксильных групп, молекул воды и алюмосиликатного каркаса, а рентгенограмма содержит выраженные дифракционные максимумы, указывающие на формирование кристаллической цеолитной фазы L-типа. Полученные результаты подтверждают перспективность использования местного алюмосиликатного сырья для получения NaL-цеолита.

Abstract

The article presents the results of obtaining NaL zeolite by a hydrothermal method using aluminosilicate raw materials. Kaolin, preliminarily converted into metakaolin by thermal activation, was used as the main aluminosilicate component, while liquid glass served as an additional silicon source. The sequence of raw-material preparation, reaction-mixture formation, and hydrothermal crystallization was considered. According to the technological scheme, the initial components were subjected to alkaline treatment and mixed with metakaolin and liquid glass, followed by hydrothermal treatment at 160–175 °C for 48 h. The resulting solid product was

Библиографическое описание: Абдурахмонов Э.Б., Турабов Б.А.У., Худайбергенов М.С. Синтез NaL цеолита на основе алюмосиликатного сырья // Universum: химия и биология : электрон. научн. журн. 2026. 9(147). URL: <https://7universum.com/ru/nature/archive/item/23317>

separated by filtration and calcined at 450 °C for 12 h. Infrared spectroscopy and X-ray diffraction were used to characterize the structural features of the synthesized material. The IR spectrum contains bands associated with hydroxyl groups, water molecules, and vibrations of the aluminosilicate framework, whereas the X-ray diffraction pattern contains pronounced reflections indicating the formation of a crystalline L-type zeolitic phase. The results confirm the potential of local aluminosilicate raw materials for the preparation of NaL zeolite.

Ключевые слова: цеолит NaL, алюмосиликатное сырьё, каолин, метакaoлин, гидротермальный синтез, кристаллизация, адсорбент.

Keywords: NaL zeolite, aluminosilicate raw materials, kaolin, metakaolin, hydrothermal synthesis, crystallization, adsorbent.

Введение

В настоящее время разработка эффективных микропористых материалов на основе доступного минерального сырья является одним из актуальных направлений физической химии и технологии адсорбентов. Особый интерес представляют цеолиты, поскольку их регулярная микропористая структура, развитая внутренняя поверхность и наличие компенсирующих катионов определяют способность к селективной адсорбции и ионному обмену. Благодаря этим свойствам цеолитные материалы применяются в процессах осушки и разделения газов, очистки технологических потоков, катализа, ионного обмена и очистки воды [5; 6].

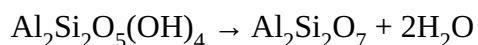
Цеолиты L-типа отличаются характерной структурой с одномерной системой каналов, образованных 12-членными кислородными кольцами. В NaL-форме отрицательный заряд алюмосиликатного каркаса компенсируется катионами натрия. Такое строение обуславливает доступность внутрикристаллического пространства для молекул адсорбата и определяет молекулярно-ситовые и адсорбционные свойства материала [1].

Формирование цеолитной фазы при гидротермальном синтезе связано с последовательным растворением и перестройкой исходных алюмосиликатных компонентов. Термическая активация каолина приводит к дегидроксилированию и образованию метакaoлина, структура которого характеризуется более высокой реакционной способностью по сравнению с исходным кристаллическим каолином. В щелочной среде компоненты метакaoлина переходят в более реакционноспособное состояние, после чего при гидротермальной обработке происходят зародышеобразование и рост кристаллов цеолитной фазы [2].

Материалы и методы

Целью исследования являлось получение NaL-цеолита на основе алюмосиликатного сырья и установление структурных признаков образующегося материала по данным ИК-спектроскопии и рентгенофазового анализа.

Образцы и методы исследования: в качестве алюмосиликатного сырья использовали каолин (рис. 1), который подвергали термической активации с целью разрушения исходной упорядоченной структуры и удаления структурных гидроксильных групп. При нагревании каолин претерпевает дегидроксилирование по общей схеме:



В результате образуется метаклоин — более реакционноспособная форма алюмосиликатного сырья. Полученный метаклоин измельчали и использовали на последующей стадии гидротермального синтеза. Жидкое стекло применяли как источник кремния. Подготовку реакционной смеси и последовательность технологических операций осуществляли в соответствии со схемой, представленной на рисунке 2.

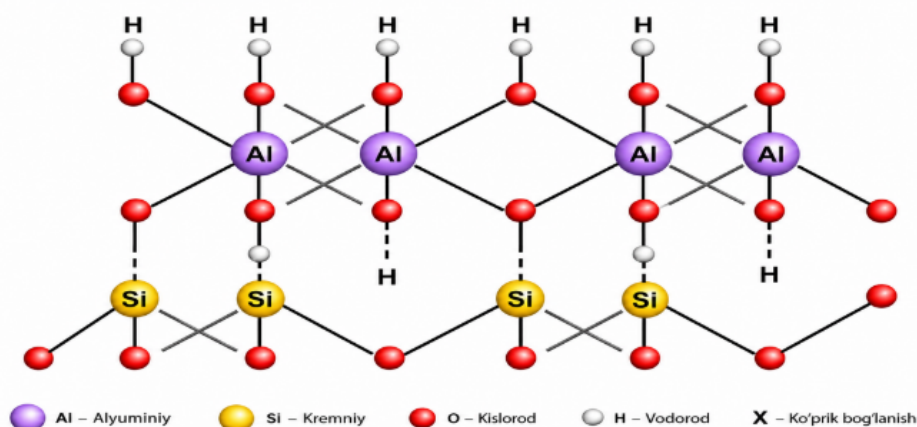


Рисунок 1. Структура каолина

На схеме показана слоистая организация алюмосиликатной структуры с участием тетраэдрически координированных атомов алюминия и кремния и атомов кислорода. Наличие гидроксильных групп в исходной структуре обуславливает необходимость термической активации перед гидротермальным синтезом. При нагревании происходит дегидроксилирование и переход каолина в метаклоин, что повышает доступность алюмосиликатных компонентов для последующей щелочной обработки [4; 3].

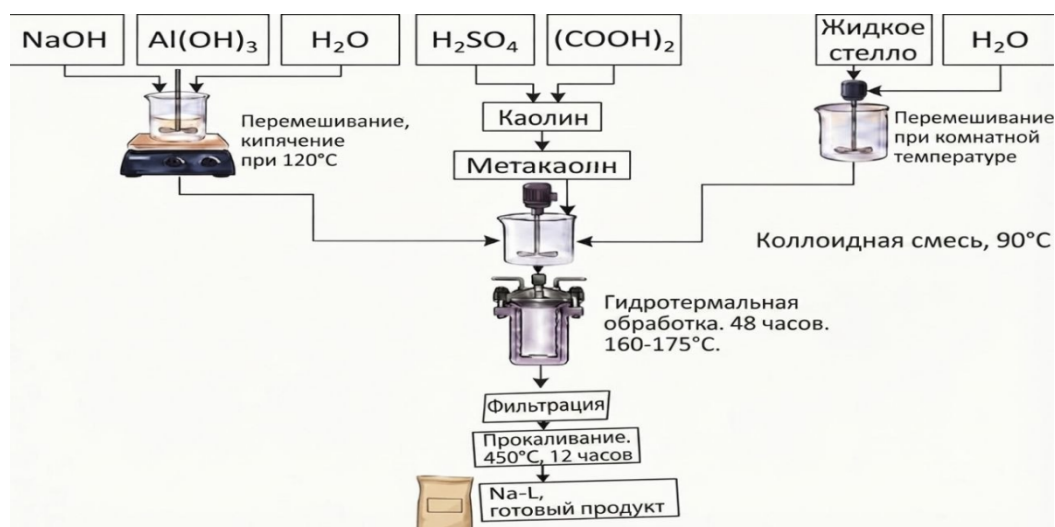


Рисунок 2. Технологическая схема получения NaL-цеолита

Согласно технологической схеме, предварительно подготовленный каолин переводили в метакаолин. Параллельно осуществляли подготовку щелочной компоненты и алюминиевого источника; после этого компоненты объединяли с метакаолином и жидким стеклом. Полученную реакционную смесь перемешивали при повышенной температуре, после чего формировали коллоидную реакционную систему. Гидротермальную обработку проводили в течение 48 часов при 160–175 °С. После завершения синтеза твёрдый продукт отделяли фильтрованием, а затем подвергали прокаливанию при 450 °С в течение 12 часов. Такая последовательность операций обеспечивает переход исходных алюмосиликатных компонентов в кристаллическую цеолитную фазу.

При подготовке продукта после гидротермальной стадии необходимо удалять свободную щёлочь и водорастворимые компоненты промывкой дистиллированной водой до состояния, близкого к нейтральному. Последующая сушка и термическая обработка обеспечивают получение образца, пригодного для структурно-аналитических исследований.

Результаты и обсуждения

Эффективность получения NaL-цеолита оценивали по результатам ИК-спектроскопического и рентгенофазового анализа. Совокупность этих методов позволяет установить наличие характерных функциональных групп и оценить формирование упорядоченной алюмосиликатной кристаллической структуры.

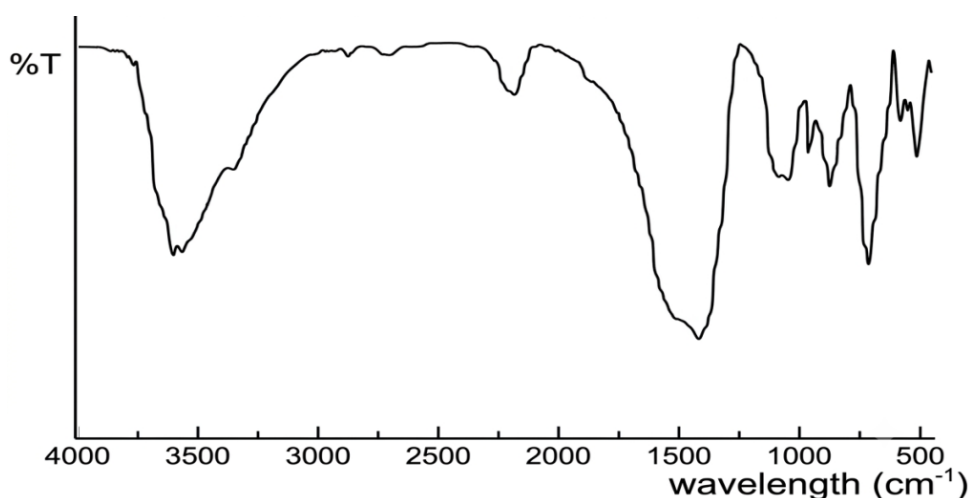


Рисунок 3. ИК-спектр синтезированного цеолита NaL

На ИК-спектре наблюдается широкая интенсивная полоса в области около 3600–3200 cm^{-1} , которая может быть связана преимущественно с валентными колебаниями О–Н-групп и адсорбированной воды. Полоса в области около 1650 cm^{-1} соответствует деформационным колебаниям молекул воды. Интенсивная область поглощения в интервале примерно 1200–900 cm^{-1} обусловлена колебаниями связей Si–O–Si и Si–O–Al алюмосиликатного каркаса. Дополнительные полосы в низкочастотной области относятся к деформационным и скелетным колебаниям алюмосиликатной структуры. Наличие совокупности этих полос согласуется с формированием гидратированного алюмосиликатного материала цеолитного типа.

Следует отметить, что для ИК-спектроскопии корректнее использовать термин «волновое число», а не «длина волны», поскольку ось спектра на рисунке 3 выражена в см^{-1} . Поэтому обозначение оси следует приводить как «Волновое число, см^{-1} ». В результате гидротермальной обработки исходной смеси, приготовленной на основе метакаолина и жидкого стекла, наблюдалось образование кристаллической алюмосиликатной фазы. На начальной стадии процесса под воздействием щелочной среды происходит частичное разрушение связей Si–O–Al в составе метакаолина и переход алюмосиликатных компонентов в раствор [8; 7].

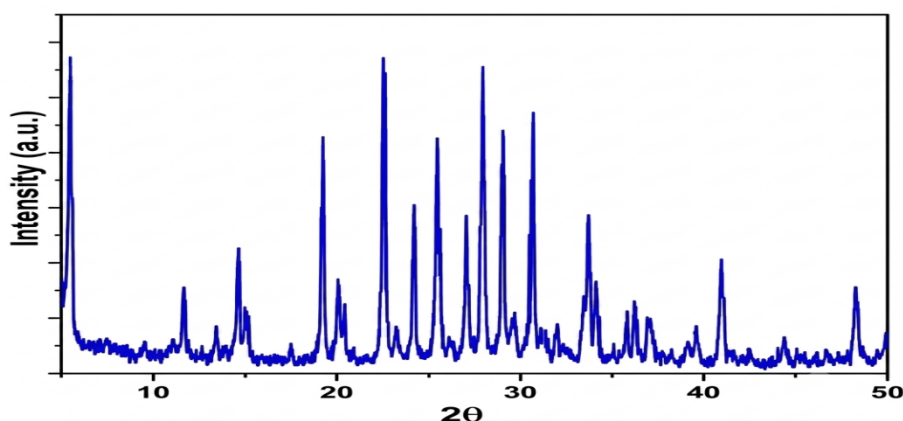


Рисунок 4. Рентгенограмма синтезированного цеолита NaL

Рентгенограмма характеризуется рядом выраженных дифракционных максимумов в диапазоне 2θ примерно от 5 до 50° . Наиболее интенсивные рефлексы наблюдаются в низко- и среднеугловой областях, что свидетельствует о наличии упорядоченной кристаллической составляющей. Согласно исходным данным исследования, совокупность наблюдаемых рефлексов соответствует формированию цеолитной фазы L-типа. Наличие достаточно узких и интенсивных максимумов указывает на значительную степень кристаллического упорядочения по сравнению с аморфным алюмосиликатным материалом.

Формирование кристаллической фазы можно связать с последовательным растворением реакционноспособных компонентов метакаолина в щелочной среде, переносом алюминиевых и кремниевых структурных единиц в реакционную среду и их последующей реорганизацией при гидротермальной обработке. При повышенной температуре и продолжительном времени выдержки создаются условия для зародышеобразования и роста кристаллов. Таким образом, режим 160–175 °C в течение 48 часов, представленный в технологической схеме, обеспечивает условия, при которых перестройка исходной алюмосиликатной системы сопровождается формированием кристаллической цеолитной фазы.

Важным фактором является также состав исходной реакционной смеси. Соотношение кремниевого и алюминиевого компонентов, щелочность среды, содержание воды и температура определяют скорость растворения исходных фаз и направление последующей кристаллизации. Поэтому получение NaL-цеолита следует рассматривать как результат согласованного действия состава реакционной смеси и гидротермального режима, а не отдельного технологического параметра.

Сопоставление данных ИК-спектроскопии и рентгенофазового анализа показывает согласованную картину: ИК-спектр подтверждает наличие алюмосиликатного каркаса и гидратированной структуры, тогда как рентгенограмма свидетельствует о формировании кристаллически упорядоченной фазы. Вместе эти результаты подтверждают получение материала цеолитного типа на основе использованного алюмосиликатного сырья.

Заключение

В работе рассмотрена возможность получения NaL-цеолита гидротермальным методом с использованием алюмосиликатного сырья. Предварительная термическая активация каолина обеспечивает его переход в метакаолин с повышенной реакционной способностью, что создаёт благоприятные условия для последующего взаимодействия алюмосиликатных компонентов в щелочной среде.

Согласно технологической схеме, сформированную реакционную смесь подвергали гидротермальной обработке при 160–175 °С в течение 48 часов, после чего продукт отделяли фильтрованием и прокаливали при 450 °С в течение 12 часов. ИК-спектроскопические данные характеризуются полосами, соответствующими гидроксильным группам, воде и колебаниям алюмосиликатного каркаса. Рентгенограмма содержит выраженные дифракционные максимумы, согласующиеся с формированием кристаллической цеолитной фазы L-типа.

Полученные результаты показывают перспективность использования местного алюмосиликатного сырья для синтеза NaL-цеолита. Для дальнейшего количественного определения степени кристалличности и фазовой чистоты целесообразно сопоставить экспериментальную рентгенограмму с эталонной дифрактограммой NaL/LTL и выполнить расчёт относительной кристалличности по выбранной методике.

Список литературы

1. Абдухаев А.Б., Ергашев О.К., Тошматова Б.А. Синтез цеолита А из комплексно очищенного Ангренского каолина // *Universum: химия и биология*. – 2026. – № 5. – DOI: 10.32743/UniChem.2026.143.5.22703.
2. Арипова М.Х., Кадиров О.Ш., Тиллаев С.У., Рузиева Ф.О. Получение синтетических цеолитов на основе местного сырья // *Universum: химия и биология*. – 2023. – № 11. – DOI: 10.32743/UniChem.2023.113.11.16095.
3. Арипова М.Х., Кадиров О.Ш., Тиллаев С.У., Файзиева Ф.М., Худайназаров Ж.О., Рузиева Ф.О. Получение низкомодульных синтетических цеолитов на основе местного сырья // *Universum: химия и биология*. – 2022. – № 2. URL: <https://7universum.com/ru/nature/archive/item/12967> (дата обращения: 22.08.2026).
4. Мамадолиев И.И., Файзуллаев Н.И., Юсупова С.С. Текстульные свойства высококремниевых цеолитов, полученные из Навбахорского бентонита // *Universum: химия и биология*. – 2021. – № 10. URL: <https://7universum.com/ru/nature/archive/item/12355> (дата обращения: 23.08.2026).

5. Мухаммаджонов М.М., Ойдинов М.Х., Диметова Ф.Д., Рахматкариева Ф.Г. Физико-химический анализ цеолита КА, полученного на основе каолина марки АКФ-78 // *Universum: химия и биология*. – 2025. – № 5(131). – DOI: 10.32743/UniChem.2025.131.5.19940.
6. Ойдинов М.Х., Каюмов А.А. Синтез NaX цеолита на основе Ангренского каолина и анализ в ИК-спектре // *Universum: химия и биология*. – 2025. – № 7. – DOI: 10.32743/UniChem.2025.133.7.20476.
7. Тураборов В.А. L zeolitining kristall o'lchamini boshqarish // *Социальные науки в современном мире*. – 2026. – № 5. URL: <https://www.in-academy.uz/index.php/ZDIF/article/view/54280> (дата обращения: 14.08.2026).
8. Turabov B.A., Xudoyberganov M.S., Abduraxmonov E.B. NaL seolitida n-geksan adsorbsiya entropiyasi // “Mahalliyashtirishda innovatsion yondashuvlar” xalqaro konferensiya materiallari to'plami. – 2023.

References

1. Abdukhaev A.B., Ergashev O.K., Toshmatova B.A. [Synthesis of zeolite A from complexly purified Angren kaolin] // *Universum: khimiya i biologiya*. – 2026. – № 5. – DOI: 10.32743/UniChem.2026.143.5.22703. (In Russ.)
2. Aripova M.Kh., Kadirov O.Sh., Tillaev S.U., Ruzieva F.O. [Obtaining synthetic zeolites based on local raw materials] // *Universum: khimiya i biologiya*. – 2023. – № 11. – DOI: 10.32743/UniChem.2023.113.11.16095. (In Russ.)
3. Aripova M.Kh., Kadirov O.Sh., Tillaev S.U., Fajzieva F.M., Khudajnazarov Zh.O., Ruzieva F.O. [Obtaining low-modulus synthetic zeolites based on local raw materials] // *Universum: khimiya i biologiya*. – 2022. – № 2. (In Russ.)
4. Mamadoliyev I.I., Fajzullaev N.I., Yusupova S.S. [Textural properties of high-silica zeolites obtained from Navbahor bentonite] // *Universum: khimiya i biologiya*. – 2021. – № 10. (In Russ.)
5. Mukhammadzhonov M.M., Ojdinov M.Kh., Dimetova F.D., Rakhmatkarieva F.G. [Physico-chemical analysis of zeolite KA obtained based on kaolin grade AKF-78] // *Universum: khimiya i biologiya*. – 2025. – № 5. – DOI: 10.32743/UniChem.2025.131.5.19940. (In Russ.)
6. Ojdinov M.Kh., Kayumov A.A. [Synthesis of NaX zeolite based on Angren kaolin and analysis by IR spectroscopy] // *Universum: khimiya i biologiya*. – 2025. – № 7. – DOI: 10.32743/UniChem.2025.133.7.20476. (In Russ.)
7. Turaborov V.A.B.A.Turabov. [Control of crystal size in L zeolite. Social Sciences in the Modern World 5(16), (2026). 4–6] – URL: <https://www.in-academy.uz/index.php/ZDIF/article/view/54280>. (accessed 04.09.2026). (In Russ.)
8. Turarov V.A., Khudoibergenov M.S., Abdurakhmonov E.V. Turabov B.A. [M.S. Khudoyberganov; E.B. Abdurakhmonov Entropy of n-hexane adsorption on NaL zeolite // Proceedings of the international conference «Innovative approaches in localization». – 2023. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию: 10.08.2026

Статья принята к публикации: 16.08.2026

Статья опубликована: 07.09.2026

УДК 66.081.6+661.183

Влияние параметров кислотной активации глинистых сорбентов на эффективность очистки компрессорных масел

Жалилов Шерали Некбоевич

*DSc, Бухарский государственный университет
Республика Узбекистан, г. Бухара*

Уринов Олим Исломович

*независимый исследователь, преподаватель
Навоийский государственный университет
Республика Узбекистан, г. Навои*

Рамазонова Зухро Ёрбоевна

*базовый докторант
Бухарский государственный университет
Республика Узбекистан, г. Бухара*

Султанов Шавкат Абдуллаевич

*д-р хим. наук (DSc), проф.
Навоийский государственный университет
Республика Узбекистан, г. Навои
E-mail: shavkat.sultonov.85@bk.ru*

Influence of acid activation parameters of clay sorbents on the efficiency of compressor oil cleaning

Jalilov Sherali Nekboyevich

*(DSc) Bukhara State University
Republic of Uzbekistan, Bukhara*

Urinov Olim Islamovich

*Independent researcher, Teacher
Navoi State of the university
Republic of Uzbekistan, Navoi*

Ramazonova Zukhro Yorboevna

*Basic doctoral student
Bukhara State University
Republic of Uzbekistan, Bukhara*

Sultanov Shavkat Abdullaevich

*PhD DSc, Professor
Navoi State University
Republic of Uzbekistan, Navoi*

Библиографическое описание: Влияние параметров кислотной активации глинистых сорбентов на эффективность очистки компрессорных масел // Universum: химия и биология : электрон. научн. журн. Жалилов Ш.Н. [и др.]. 2026. 9(147). URL: <https://7universum.com/ru/nature/archive/item/23323>

Аннотация

В данной статье исследована технология получения эффективных сорбентов для регенерации и очистки компрессорных масел. В ходе научной работы были испытаны различные условия кислотной модификации глинистых сорбентов. Особое внимание уделено влиянию температуры термической обработки, продолжительности активации и соотношения компонентов при приготовлении сорбента на его адсорбционные свойства.

По результатам экспериментов установлено, что наибольшую адсорбционную активность при очистке компрессорных масел проявил сорбент, полученный из местного глинистого сырья при оптимальных параметрах кислотной и термической активации: активации при температуре 200 °C в течение 1,5 часа и соотношении масс — кислота: вода: глина = 1: 10: 2. Полученный сорбент эффективно удалял механические примеси, продукты окисления и смолистые соединения из состава отработанного компрессорного масла, что способствовало значительному улучшению его физико-химических показателей.

Согласно результатам адсорбционно-изотермического анализа, удельная поверхность кислотно-активированной глины составила 242 мл/г, что в 2 раза выше по сравнению с природной глиной (121 мл/г). При оптимальном соотношении кислота: вода: глина = 1: 10: 2 кинематическая вязкость регенерированного компрессорного масла составила 61 мм²/с, температура вспышки — 244 °C, а устойчивость к окислению — 3090 мин. Полученные результаты свидетельствуют о значительном улучшении показателей отработанного масла по сравнению с исходными значениями (27 мм²/с, 196 °C и 800 мин соответственно). Предлагаемая технология применения сорбента позволяет эффективно регенерировать компрессорные масла, повышать экономическую и экологическую эффективность, а также является важным фактором для повторного использования ресурсов и создания малоотходной технологии.

Abstract

This article investigates a technology for producing effective sorbents for the regeneration and purification of compressor oils. During the study, various conditions for the acid modification of clay-based sorbents were tested. Particular attention was paid to the effects of thermal treatment temperature, activation duration, and the component ratio used in sorbent preparation on its adsorption properties.

The experimental results demonstrated that the sorbent obtained from locally sourced clay raw materials under optimal acid and thermal activation conditions exhibited the highest adsorption activity in the purification of compressor oils. The optimal conditions included activation at a temperature of 200 °C for 1.5 hours and a mass ratio of acid: water: clay = 1: 10: 2. The resulting sorbent effectively removed mechanical impurities, oxidation products, and resinous compounds from the composition of used compressor oil, which contributed to a significant improvement in its physicochemical properties.

According to the results of the adsorption–isotherm analysis, the specific surface area of the acid-activated clay was 242 ml/g, which is twice as high as that of the natural clay (121 ml/g). At the optimal acid: water: clay = 1: 10: 2 ratio, the kinematic viscosity of the regenerated compressor oil was 61 mm²/s, the flash point was 244 °C, and the oxidation stability was 3090 min. These

results indicate a significant improvement in the properties of the used oil compared with the initial values of 27 mm²/s, 196 °C, and 800 min, respectively. The proposed technology for applying the sorbent enables the effective regeneration of compressor oils, improves economic and environmental efficiency, and serves as an important factor in resource reuse and the development of low-waste technologies.

Ключевые слова: бентонитовая глина, пористая структура, кислотная активация, адсорбционная способность, регенерация отработанного компрессорного масла, адсорбционная кинетика, компрессорное масло, сорбент, адсорбция, активация, регенерация, кислотная обработка.

Keywords: bentonite clay, porous structure, acid activation, adsorption capacity, regeneration of used compressor oil, adsorption kinetics, compressor oil, sorbent, adsorption, activation, acid treatment, regeneration.

Введение

Компрессорные установки широко применяются на промышленных предприятиях, и их эффективная работа напрямую зависит от качества смазочной системы. Компрессорные масла выполняют функции снижения механического трения, охлаждения устройств и защиты от коррозии. Однако в результате длительного использования в составе масла накапливаются механические примеси, продукты окисления, смолистые вещества и ионы металлов. Это приводит к ухудшению физико-химических свойств масла.

Прямой выброс отработанных компрессорных масел вызывает экологические проблемы. По этой причине разработка технологий их восстановления и регенерации является одной из актуальных научно-практических задач. В настоящее время существуют физические, химические и физико-химические методы очистки масел, среди которых адсорбционный метод выделяется своей высокой эффективностью.

В последние годы было проведено множество научных исследований по регенерации отработанных масел. Исследователями адсорбционный метод признан экономически выгодной и экологически безопасной технологией [6]. Сорбционные свойства природных бентонитов во многих случаях недостаточны для промышленных нужд. Поэтому их активация химическими методами широко применяется. Кислотная активация является одним из наиболее эффективных методов, в процессе которого с помощью серной, соляной или азотной кислот происходит обмен ионами Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ и K⁺ между слоями, некоторые октаэдрические ионы Al³⁺, Fe³⁺ и Mg²⁺ частично переходят в раствор, в результате чего образуются новые микро- и мезопоры. При этом увеличивается площадь поверхности и увеличивается число активных центров типа Бренстеда и Льюиса [10].

Глинистые минералы, содержащие в своем составе алюмосиликаты, обладают высокими ионообменными и адсорбционными свойствами. Сорбенты на основе бентонита и каолина эффективно применяются при очистке нефтепродуктов. В исследованиях установлено, что адсорбционная емкость глины, активированной кислотой, увеличивается в несколько раз по сравнению с обычной глиной [5].

Природные глины, особенно алюмосиликатные минералы, такие как бентонит, монтмориллонит, каолинит и палыгорскит, являются перспективными сорбентами благодаря своей высокой ионообменной способности, слоистой кристаллической структуре, механической устойчивости и широкой распространенности. Основную часть состава бентонита составляет монтмориллонит. Слоистая кристаллическая решетка 2:1 монтмориллонита способна удерживать молекулы воды и обменные катионы, что определяет его сорбционные возможности [9].

В процессе обработки кислотой некоторые ионы металлов, содержащиеся в составе глины, вымываются, в результате чего формируется пористая структура сорбента. Это увеличивает число его активных центров. Активация на основе серной и соляной кислот является наиболее широко применяемым методом [12].

Также термическая обработка сорбента считается одним из важных этапов. С повышением температуры влажность сорбента снижается и активируются его адсорбционные активные центры. Однако чрезмерно высокая температура может привести к разрушению кристаллической структуры сорбента [2]. В исследовании, проведенном Тухтаевым С.А. и Амоновым М.Р., изучены возможности регенерации отработанных компрессорных масел адсорбционным методом. Авторы модифицировали природные минеральные сорбенты Узбекистана, в частности Навбахорский бентонит и сапропелевый минерал Аральского региона, и оценили их эффективность при очистке масел. Согласно результатам исследования, термохимически активированный сапропелевый сорбент продемонстрировал высокую эффективность в восстановлении эксплуатационных свойств масла, обеспечивая значительное снижение кислотного числа и вязкости. Данный подход является перспективным с точки зрения повторного использования отработанных масел и ресурсосбережения. В рассматриваемой статье использование бентонита, в свою очередь, обеспечивает экономический эффект [4]. Проведен сравнительный анализ сорбционных свойств порошка активированного палыгорскита на основе различных методов обработки. Результаты исследований показали, что процесс активации значительно повышает эффективность адсорбции минерала, улучшая его удельную поверхность и пористую структуру [3]. Установлено, что в результате активации бентонита кислотой его кристаллическая структура и пористость значительно изменяются. Согласно результатам исследования, кислотная обработка увеличивает удельную поверхность бентонита, улучшая его адсорбционные свойства [8]. Проанализированы методы химической модификации поверхности бентонита и оценено их влияние на эффективность адсорбции. Результаты показали, что модифицированный бентонит эффективно улавливает ионы тяжелых металлов и органические загрязнители [13]. Изучены адсорбционные свойства модифицированных кислотой глинистых минералов при очистке сточных вод. В исследовании отмечается, что кислотная активация увеличивает количество активных центров минерала, обеспечивая высокую эффективность адсорбции загрязняющих веществ [11]. Авторами изучено влияние стадий подготовки глинистых порошков до их активации на сорбционные свойства. В исследовании обосновано, что такие подготовительные процессы, как уменьшение размера частиц, сушка и разделение на однородную фракцию, повышают эффективность активации и улучшают сорбционную активность адсорбента [1]. В процессе адсорбции сорбенты поглощают вредные вещества из состава масла на свою поверхность. В качестве сорбентов

широко используются природные глинистые минералы, бентонит, каолин, цеолит и другие алюмосиликатные материалы. Для повышения их адсорбционных свойств проводятся работы по активации различными методами. В частности, метод кислотной активации имеет важное значение, так как он увеличивает пористость и площадь поверхности сорбента. Поэтому определение условий и оптимальных технологических параметров кислотной активации глинистых порошков в процессе получения эффективных сорбентов для очистки отработанных компрессорных масел является одной из актуальных проблем на сегодняшний день.

Целью данного исследования является определение оптимальных параметров кислотной и термической активации местного глинистого сырья для очистки компрессорных масел.

Для достижения этой цели были определены следующие задачи: изучение физико-химических свойств образцов местной глины, исследование процесса кислотной активации сорбента, определение влияния температуры и времени на активность сорбента, изучение влияния соотношения *кислота: вода: глина* на процесс адсорбции, оценка эффективности очистки компрессорного масла, определение оптимальных технологических параметров, а также максимально приемлемых параметров кислотной и термической активации местного глинистого сырья для очистки компрессорных масел.

Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования использовались отработанные компрессорные масла и образцы местной глины. Бентонитовая глина (содержащая не менее 60–70 % монтмориллонита, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ = от 3,3 до 3,6) первоначально измельчается до размера 0,05–2 мм. Затем готовится суспензия из 20–27 массовых частей сухой глины и 70–75 массовых частей воды. В приготовленную смесь добавляется 4–5 массовых частей серной кислоты (с концентрацией 96–98 %), после чего процесс активации проводится при температуре 190–220 °С, под давлением 2,0–4,0 атм. в течение 1,5–2,0 часов при интенсивном перемешивании, постепенно снижая температуру до 140–160 °С, добавляют 3–5 массовых частей цеолита и продолжают перемешивать в течение 1,5±2,0 часов при 150–200 об/мин. После активации полученная пульпа фильтруется в два этапа: реакционная масса направляется на первый этап фильтрации, промывается и сушится, а значение pH доводится до 1,0–1,4, сушится до достижения влажности 5 %±10 %, осуществляется второй этап фильтрации и промывки, в течение которого значение pH доводится до 3,2–3,6, затем направляется на сушку до влажности 7 %±10 %. Высушенный сорбент 0044К пропускают через сито.

Качественные показатели компрессорного масла оценивались на основе следующих параметров: изменение цвета, содержание механических примесей, плотность, кинематическая вязкость, кислотное число, эффективность сорбции.

Результаты исследования и их анализ

В ходе исследования были изучены адсорбционные свойства сорбентов путем их термической обработки.

В сорбентах, приготовленных при 100 °С, эффективность адсорбции была относительно низкой из-за неполного удаления влаги. При 150 °С наблюдалось повышение активности сорбента, однако его способность поглощать некоторые органические соединения оказалась недостаточной.

На рисунках 1, 2, 3 и в таблице 1 показано, что сорбент, приготовленный при температуре 200 °С, достиг самых высоких результатов. При такой температуре хорошо сформировалась пористая структура сорбента, что обусловлено увеличением количества адсорбционных центров.

В результате смолистые вещества и механические примеси в составе компрессорного масла были эффективно удалены.

При 250 °С в некоторых случаях наблюдалось частичное разрушение структуры сорбента. Это, в свою очередь, привело к снижению эффективности адсорбции.

Таким образом, в качестве оптимальной была выбрана температура 200 °С.

Длительность термической обработки изучалась.

При обработке в течение 0,5 часа полной активации сорбента не наблюдалось. При 1 часе адсорбционные свойства улучшились, однако максимальный результат достигнут не был.

Сорбционная эффективность сорбента, обработанного в течение 1,5 часов, показывает наилучшие результаты по сравнению с кривыми, представленными на рисунке 1 ниже.

За это время внутренняя структура сорбента сформировалась оптимальным образом, и адсорбционные центры перешли в активное состояние.

Обработка в течение 2 часов не дала значительного преимущества и в некоторых случаях привела к увеличению расхода энергии.

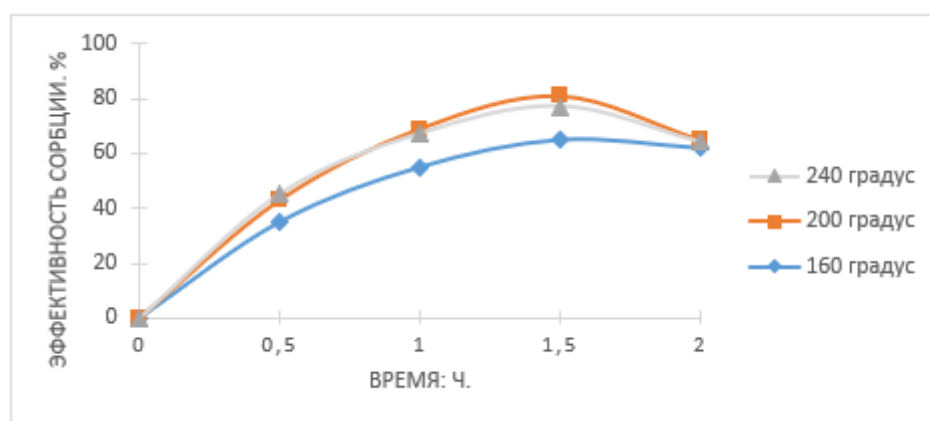


Рисунок 1. Зависимость степени сорбции активированных порошков глины от температуры и времени

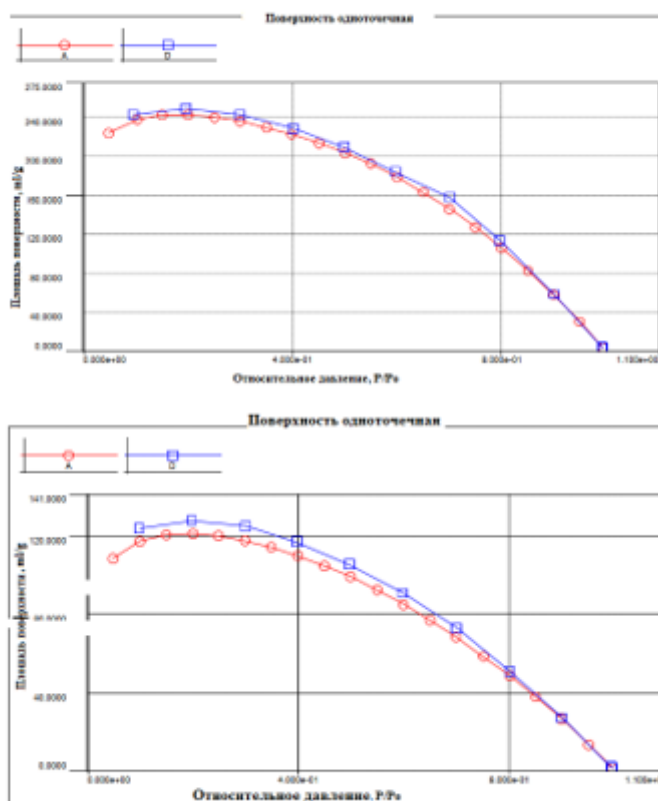
В результате оптимальным временем было признано 1,5 часа.

Влияние соотношения кислота : вода : глина

При соотношении 1:5:2 из-за высокой концентрации кислоты наблюдались некоторые структурные изменения. При соотношении 1:12:2 из-за относительно меньшего количества кислоты активация оказалась недостаточной.

Следовательно, полученное соотношение *кислота: вода: глина* = 1:10:2 было определено как оптимальный состав для процесса активации сорбента. Из компонентов, составляющих добавляемый состав в процессе получения сорбентов видно, что массовые соотношения глины и кислоты друг с другом не изменились, но в результате изменения массового соотношения воды изменилась концентрация кислоты, действующей на активируемую глину.

а)



б)

Рисунок 2. Одноточечная диаграмма BET: а) природная глина, б) активированная глина

Полученный образец можно наблюдать на рисунке 2 ниже с помощью адсорбционно-изотермического анализа сорбционных свойств и поверхности.

Из результатов данного адсорбционно-изотермического анализа видно, что объем поверхности активированного глиняного порошка (242 мл/г) в один раз больше, чем природного глиняного порошка (121 мл/г). Кроме того, результаты ИК-и СЭМ-анализа активированной глины можно наблюдать на рисунке 3 ниже

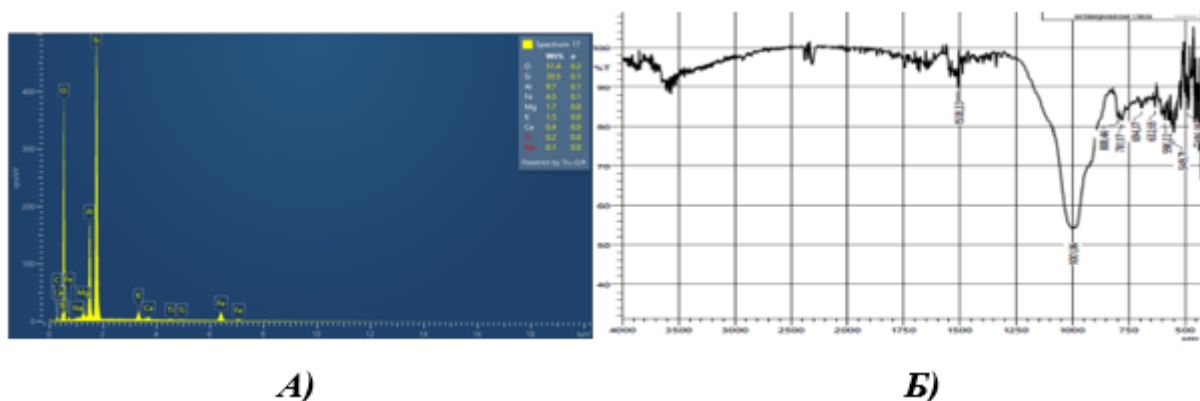


Рисунок 3. ИК и СЭМ анализ активированной глины. А) анализ ИК. Б) СЭМ-анализ

С помощью данных анализов установлено, что в ИК-спектрах сорбента, полученного из бентонитового порошка, присутствуют полосы поглощения при 3830–3610, 1710, 1655, 1543, 1000 и 467 см⁻¹. Данные полосы соответствуют остаточным молекулам кристаллизационной воды в активированной массе, а также изменениям содержания активных металлов и наличию гидроксидов металлов, взаимодействовавших с ионами водорода в кислой среде. Деформационные колебания групп OH⁻, H⁺ и SO₄²⁻ в области 1655–1543 см⁻¹ смещаются в низкочастотную область. Широкая полоса поглощения в диапазоне 1100–1000 см⁻¹ может быть отнесена к колебаниям структурных групп (SiO₄)⁴⁻ и SiO₂; соответствующие полосы также проявляются в области около 800 см⁻¹.

Научная работа Ковальчука и соавторов [10] глубоко раскрыла фундаментальные структурные и сорбционные свойства бентонита, а данное исследование отличается технологической оптимизацией, применением в реальных промышленных условиях, восстановлением качественных показателей масла и обоснованием экономической и экологической эффективности.

Эффективность очистки компрессорных масел

При очистке компрессорного масла с использованием сорбента, полученного в оптимальных условиях, были зафиксированы следующие результаты:

Таблица 1.

Физико-химические свойства компрессорного масла (Shell Corena S3RC 68)

№	Кислота : вода : глина	Кинематическая вязкость (при 40°C)	Температура вспышки	Стабильность против окисле- ния (RPVOT)	Рекомендуемый сервисный интер- вал (винтовой)
	Единица измерения	mm ² /s (cSt)	°C	мин.	часы
1	Показатели по ГОСТ (ТУ)	68	248	700	4000
2	Характеристики отработанного ком- прессорного масла	27	196	420	800
3	1:5:2	50	232	600	3000
4	1:8:2	59	243	670	3070
5	1:10:2	61	244	680	3090
6	1:12:2	59	242	675	3100

Высокая адсорбционная активность сорбента объясняется эффективным удержанием продуктов окисления и смолистых веществ, содержащихся в масле.

Высокая адсорбционная активность сорбента объясняется эффективным удержанием продуктов окисления и смолистых веществ, содержащихся в масле.

Для получения физико-химических параметров применялись следующие приборы:

- для измерения вязкости использовался вискозиметр – Стандарт: ASTM D445, ISO 3104 Cannon Instrument Company, бренд – Labtron LUV-A10.
- прибор для определения температуры вспышки — открытый тигельный датчик температуры вспышки Стандарт: ASTM D92, ASTM D93, бренды: Tanaka APM-8, PAC OptiFlash;
- прибор для определения стойкости к окислению – Аппарат для испытания на стойкость к окислению Стандарт: ASTM D943, ASTM D2272. Бренды: Petrotest RPVOT, Stanhope-Seta Oxidation.

Экономическое и экологическое значение

Внедрение технологии регенерации компрессорных масел обеспечивает ряд экономических и экологических преимуществ.

Во-первых, восстановление отработанных масел снижает затраты на новые масла. Это повышает экономическую эффективность предприятий.

Во-вторых, использование местного глинистого сырья снижает потребность в импортируемых сорбентах.

В-третьих, предотвращается сброс отработанных масел в окружающую среду. В результате снижается загрязнение почвенных и водных ресурсов.

Разработка экологически безопасных технологий является на сегодняшний день одним из приоритетных направлений промышленности.

Заключение

Установлено, что при температуре выше 200°C начинается частичная деградация алюмосиликатной структуры и уменьшается количество активных центров адсорбции.

На основе проведенных исследований сделаны следующие выводы: наилучший результат наблюдался у сорбента, обработанного при температуре 200 °C в течение 1,5 часов; установлено, что соотношение *кислота:вода:глина* = 1:10:2 является оптимальным составом; полученный сорбент эффективно удалил вредные примеси из компрессорного масла и улучшил показатели качества масла.

Список литературы

1. Султанов, Ш., Холов, Х., Орипова, М. Подготовка к активации глинистых порошков для повышения сорбционных свойств / Ш. Султанов, Х. Холов, М. Орипова // Сообщения НУУз. Серия естественных наук. – 2023. – № 3.

2. Султонов Ш.А., Холов Х.М., Асророва Ф.А. Активация палыгорскитной глинной почвы для отбеливания масел // Образование и наука в XXI веке: междунар. науч.-образовательный электрон. журн. – 2021. – № 20.
3. Султонов Ш.А., Холов Х.М., Сайимова Д.Қ. Сравнительные показатели сорбционных характеристик активированного палыгорскитного порошка // Universum: химия и биология: электрон. научн. журн. – 2023. – № 10. URL: <https://7universum.com/ru/nature/archive/item/16026> (дата обращения: 02.10.2023).
4. Тухтаев С.А., Амонов М.Р. Химическая очистка и повторное использование в производстве отработанных компрессорных масел в нефтегазовой промышленности [Электронный ресурс]. // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. [Электронный ресурс]. URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23071> (дата обращения: 09.08.2026).
5. Тухтаев С.А., Амонов М.Р., Ахмедов М.М. Очистка компрессорных масел, применяемых в нефтегазовой промышленности, на основе сорбентов. 1-Бухарский государственный университет, 2-Шуртанское нефтегазодобывающее управление // Композиционные материалы: науч. журн. – 2026. – № 2.
6. Тухтаева С.А., Амонова М.Р. Получение эффективных сорбентов на основе природных сапропелевых глинистых порошков и их исследование // Научно-технический журнал «Development of Science» Бухарского государственного технического университета. – 2026. – № 6.
7. Холов Х.М., Собиров Б.Б., Алланазаров Х., Султонов Ш.А. Методика повышения адсорбционных свойств почвы палыгорскитной глины [Электронный ресурс]. // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. – 2021. URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/11315> (дата обращения: 01.08.2026).
8. Abdullah, W. Structural changes in acid-activated bentonite / W. Abdullah // Applied Clay Science. – 2022. – Т. 123. – P. 105–112.
9. Bergaya F., Theng B.K.G., Lagaly G. Handbook of Clay Science // International Research Journal of Pure and Applied Chemistry. – 2024. – Т. 25, № 5.
10. Kovalchuk I., Farbun I., Vyshnevskiy O. Acid activation of bentonite: structural transformation and sorption performance for uranium, cesium, and strontium. – No. 3. – 2026. – Vol. 85. – Art. 134.
11. Li, Y. et al. Acid-modified clays for wastewater treatment / Y. Li [et al.] // Journal of Hazardous Materials. – 2020. – Т. 399. – DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.122832.
12. Osmić S., Odobašić A., Begić S. Selma Osmić, Amra Odobašić, Sabina Begić. The Influence of Acid Activation on Surface Characteristics of Natural Bentonite // International Research Journal of Pure and Applied Chemistry. // International Research Journal of Pure and Applied Chemistry. – 2024. – Т. 25, № 5.
13. Zhang, J. et al. Surface engineering of bentonite for adsorption / J. Zhang [et al.] // Chemical Engineering Journal. – 2023. – Т. 452. – DOI: 10.1016/j.cej.2022.139247.

References

1. Sultanov Sh., Kholov Kh., Oripova M. [Preparation for the activation of clay powders to enhance sorption properties]. Soobshcheniya NUUz. Seriya estestvennykh nauk, 2023, no. 3/2, Tashkent. (In Russ.)
2. Sulstonov Sh.A., Kholov Kh.M., Asrorova F.A. [Activation of paligorskite clay soil for oil bleaching]. Obrazovanie i nauka v XXI veke: mezhdunarodnyi nauchno-obrazovatelnyi elektronnyi zhurnal, 2021, no. 20, iss. 5, P. 1276–1278. (In Russ.)
3. Sulstonov Sh.A., Kholov Kh.M., Saiimova D.Q. [Comparative indicators of the sorption characteristics of activated paligorskite powder]. Universum: khimiya i biologiya: elektronnyi nauchnyi zhurnal, (112–2). Available at: – 2023. – № 10. – P. 62–67. – URL: <https://7universum.com/ru/nature/archive/item/16026> (дата обращения: 02.10.2023). (In Russ.)
4. Tukhtaev S.A., Amonov M.R. [Chemical treatment and reuse of spent compressor oils in oil and gas industry production]. Universum: tekhnicheskie nauki: elektronnyi nauchnyi zhurnal. Available at: – URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23071> (дата обращения: 09.08.2026). (In Russ.)
5. Tukhtaev S.A., Amonov M.R., Akhmedov M.M. [Purification of compressor oils used in the oil and gas industry based on sorbents]. Kompozitsionnye materialy: nauchnyi zhurnal, 2026, no. 2. (In Russ.)
6. Tukhtaeva S.A., Amonova M.R. [Obtaining effective sorbents based on natural sapropel clay powders and their study]. Development of Science: nauchno-tekhnicheskii zhurnal Bukharskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2026, no. 6. (In Russ.)
7. Kholov Kh.M., Sobirov B.B., Allanazarov Kh., Sulstonov Sh.A. [Methodology for enhancing the adsorption properties of paligorskite clay soil]. Universum: tekhnicheskie nauki: elektronnyi nauchnyi zhurnal, 2021, iss. 2 (83). Available at: – URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/11315> (дата обращения: 01.08.2026). (In Russ.)
8. Abdullah W. Structural changes in acid-activated bentonite. Applied Clay Science, 2022, vol. 123, P. 105–112.
9. Bergaya F., Theng B.K.G., Lagaly G. Handbook of Clay Science. International Research Journal of Pure and Applied Chemistry, 2024, vol. 25, iss. 5.
10. Kovalchuk I., Farbun I., Vyshnevskiy O. Acid activation of bentonite: structural transformation and sorption performance for uranium, cesium, and strontium, 2026, vol. 85, no. 3, art. 134.
11. Li Y. et al. Acid-modified clays for wastewater treatment // Journal of Hazardous Materials. – 2020. – DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.122832.
12. Osmić S., Odobašić A., Begić S. The influence of acid activation on surface characteristics of natural bentonite. International Research Journal of Pure and Applied Chemistry, 2024, vol. 25, iss. 5.
13. Zhang J. et al. Surface engineering of bentonite for adsorption. Chemical Engineering Journal, 2023, vol. 452, P. 139247. DOI: 10.1016/j.cej.2022.139247.

Статья поступила в редакцию: 05.08.2026

Статья принята к публикации: 16.08.2026

Статья опубликована: 07.09.2026

УДК 661.8+546.11

DOI: 10.32743/UniChem.2026.147.9.23338

Получение микропористых адсорбентов из местного каолина Султунувайс гидротермальным методом (на основании обзора литературы)

Султанов Мирибек Жаббарбергенович

ассистент-преподаватель

Нукусский государственный педагогический институт

Республика Узбекистан, г. Нукус

E-mail: miribek_sultanov@ndpi.uz

Джуманова Зияда Кеунимжаевна

канд. хим. наук, доц.

Каракалпакский государственный университет им. Бердаха

Республика Узбекистан, г. Нукус

E-mail: ziyada07@list.ru

Obtaining microporous adsorbents from local Sultunuvaiss kaolin by hydrothermal method (based on a literature review)

Sultanov Miribek Jabbarbergenovich

Assistant, Lecturer

at Nukus State Pedagogical Institute

Uzbekistan, Nukus

Jumanova Ziyada Keunimzhaevna

PhD in Chem. Sci., Associate Professor

of the Karakalpak State University named after Berdakh

Uzbekistan, Nukus

Аннотация

В данной научно-исследовательской работе выполнен анализ современных отечественных и зарубежных источников, посвящённых технологическим аспектам получения высокоэффективных микропористых адсорбентов методом гидротермального синтеза с использованием каолинового сырья месторождения Султунувайс. Рассмотрены физико-химические закономерности термической активации каолинита с образованием реакционноспособной метакаолиновой фазы и механизмы гидротермальной кристаллизации синтетических цеолитов. Проанализированы основные технологические факторы, определяющие процессы цеолитообразования: молярные соотношения компонентов

Библиографическое описание: Султанов М.Ж., Джуманова З.К. Получение микропористых адсорбентов из местного каолина Султунувайс гидротермальным методом (на основании обзора литературы) // Universum: химия и биология : электрон. научн. журн. 2026. 9(147). URL: <https://7universum.com/ru/nature/archive/item/23338>

реакционной смеси ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$, $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$), концентрация щелочного агента, температура синтеза, продолжительность предварительного старения геля и время кристаллизации. Особое внимание уделено формированию фазового состава, пористой структуры, удельной поверхности и сорбционной ёмкости синтезируемых материалов. Проведённый анализ научно-технических данных подтверждает экономическую эффективность и перспективность использования каолинового сырья месторождения Султунуайс для получения высококачественных цеолитов с заданными структурными и сорбционными свойствами, предназначенных для применения в процессах адсорбции, очистки воды, газоразделения и катализа, обеспечивающих высокую эффективность удаления загрязняющих веществ из жидких и газовых сред, а также расширяющих возможности промышленного использования синтезированных материалов в экологических, химико-технологических и энергетических процессах различного назначения в будущем.

Abstract

This research study presents an analysis of contemporary domestic and international scientific literature devoted to the technological aspects of producing highly efficient microporous adsorbents by hydrothermal synthesis using kaolin raw materials from the Sultunuais deposit. The physicochemical principles of the thermal activation of kaolinite leading to the formation of a highly reactive metakaolin phase, as well as the mechanisms of hydrothermal crystallization of synthetic zeolites, are examined. The main technological factors governing the zeolite formation process have been analyzed, including the molar ratios of the reaction mixture components ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$, and $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$), the concentration of the alkaline agent, synthesis temperature, gel aging time, and crystallization duration. Particular attention is given to the development of the phase composition, porous structure, specific surface area, and adsorption capacity of the synthesized materials. The analysis of the available scientific and technical data confirms the economic feasibility and promising potential of utilizing kaolin raw materials from the Sultunuais deposit for the production of high-quality zeolites with tailored structural and adsorption properties. These materials are intended for applications in adsorption, water purification, gas separation, and catalysis, providing high efficiency in the removal of contaminants from liquid and gaseous media. Furthermore, they expand the prospects for the industrial application of the synthesized materials in environmental, chemical-technological, and energy-related processes of various purposes in the future.

Ключевые слова: каолин, Султунувайс, гидротермальный синтез, цеолит, микропористый адсорбент, алюмосиликат, исследования ученых Узбекистана.

Keywords: kaolin, Sultunuvais, hydrothermal synthesis, zeolite, microporous adsorbent, aluminosilicate, research by scientists of Uzbekistan.

Введение

С каждым годом на промышленных предприятиях нефтегазового комплекса возрастает спрос на применение высокоэффективных адсорбентов при использовании химических и экологических технологий. В частности, микропористые алюмосиликатные материалы

отличаются высокой удельной поверхностью, катионообменной способностью и термической стабильностью. По этой причине цеолиты и другие микропористые материалы широко применяются для очистки воды от ионов тяжелых металлов, осушки газов, разделения углеводородов и в качестве носителей катализаторов [5; 7; 13; 23].

Из-за высокой стоимости высокочистых источников кремния и алюминия при производстве синтетических цеолитов широко развивается технология получения цеолитов путем гидротермального синтеза из природного каолина [7; 14; 17]. Природный каолин является перспективным минеральным сырьем благодаря своей дешевизне, широкой распространенности и алюмосиликатному составу [2; 19]. Разведанные в Узбекистане месторождения каолина позволяют производить продукцию с высокой добавленной стоимостью из местных минеральных ресурсов. Среди них особое значение имеют запасы каолина в районе Султунувайс, и оценка возможности получения высокоэффективных микропористых адсорбентов путем их гидротермальной переработки является одной из актуальных научных задач [1; 2; 24; 9].

Каолин является одним из важных видов природного алюмосиликатного минерального сырья и состоит в основном из минерала каолинита. Идеальная химическая формула каолинита выражается как $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, и он относится к группе слоистых алюмосиликатных минералов [5]. Его кристаллическая структура состоит из кремнекислородных тетраэдрических (SiO_4) и алюминий-кислородно-гидроксильных октаэдрических (AlO_6) слоев, связанных между собой водородными связями, что и определяет физико-химические свойства каолина [6]. Состав природного каолина, помимо каолинита, включает в себя такие минеральные примеси, как кварц, полевошпат, иллит, монтмориллонит, кальцит, оксиды железа и титана. Количество этих примесей зависит от геологического происхождения и условий образования месторождения, оказывая существенное влияние на химический состав, дисперсность и реакционную способность каолина [6; 16; 20]. В частности, высокое содержание кварца может снижать реакционную способность, а оксиды железа могут изменять цвет и некоторые физико-химические свойства синтезированного материала.

Материалы и методы

Методологической основой данной работы является систематический аналитический обзор отечественных и зарубежных научных публикаций, посвященных методам гидротермальной переработки алюмосиликатного сырья. Поиск литературных источников осуществлялся в ведущих международных и отечественных научно-метрических базах данных (Scopus, Web of Science, Google Scholar и ScienceDirect) по профильной тематике получения микропористых адсорбентов из каолинового сырья.

Временной рамкой поиска охвачены публикации за последние 10 лет (2016–2026 гг.). В качестве основных критериев отбора выступали их прямая тематическая направленность на переработку каолина, детальный анализ технологических параметров синтеза, а также публикация результатов в рецензируемых научных изданиях.

Пригодность каолина для гидротермального синтеза прежде всего определяется содержанием в нем SiO_2 и Al_2O_3 , а также их молярным соотношением. Эти показатели напрямую влияют на тип образующейся цеолитной фазы, степень кристалличности, пористую структуру и адсорбционные свойства в процессе синтеза [10; 14; 17]. В связи с этим перед гидротермальным синтезом важно оценить минералогический и химический состав каолина с использованием современных методов анализа, таких как рентгенофазовый анализ (XRD), рентгенофлуоресцентный анализ (XRF), инфракрасная спектроскопия (FTIR) и сканирующая электронная микроскопия (SEM) [6; 18].

Синтез цеолитов из каолина традиционно состоит из двух основных этапов:

Термическая активация (метакаолинизация). Прокаливание сырого каолина при температуре 650–800 °С, в результате чего разрушается кристаллическая решетка каолинита с образованием аморфного метакаолина, обладающего высокой реакционной способностью [12; 15].

Гидротермальная кристаллизация. Смешивание метакаолина с раствором NaOH 2–4 М, выдержка (созревание геля) при комнатной температуре для формирования зародышей кристаллов, с последующим гидротермальным синтезом в автоклавах при температуре 80–120 °С в течение 12–48 часов. По завершении синтеза полученный осадок промывается дистиллированной водой до нейтрального pH, фильтруется и высушивается [2; 11; 12; 20].

Результаты и обсуждение

В исследованиях, проведенных отечественными учеными Н.И. Файзуллаевым, И.И. Мамадолиевым и др., доказана возможность получения высококремнистых цеолитов и микропористых адсорбентов путем химической и термической активации алюмосиликатного сырья Узбекистана [10; 13]. На основе анализа литературы основные технологические параметры синтеза различных типов цеолитов приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Основные технологические параметры синтеза различных типов цеолитов

Тип цеолита	Сыр-ье	Тем-ра прокаливания, °С	Конц. NaOH, М	Тем-ра кристаллизации, °С	Время, ч	Основное применение	Источ ник
LTA (Zeolite A)	Мета каолин	650–700	2–3	80–100	12-24	Умягчение воды, ионный обмен	[13]
NaA	Мета каолин	650–700	2–4	90–100	12-24	Адсорбент, детергенты	[4; 20]
NaX	Мета каолин	650–750	3–4	90–110	24-48	Разделение газов, адсорбция	[14; 23]
FAU (NaY)	Мета каолин	650–750	3–4	100–120	24-48	Катализ, нефтепереработка	[8; 24]
Содалит	Мета каолин	700–800	4–5	100–120	24-48	Сорбент, керамика	[12]

Из данных таблицы видно, что при синтезе различных типов цеолитов температура прокаливания, концентрация щелочи, температура кристаллизации и продолжительность процесса различаются. В частности, если цеолиты типов LTA и NaA образуются при относительно низких температурах, то для получения цеолитов типов FAU и NaX требуются более высокая температура и более длительное время кристаллизации [7; 10].

В научных изысканиях ученых Узбекистана [10; 12; 20] определены оптимальные режимы активации метакаолина и гидротермальной кристаллизации. В частности, указано, что температура метакаолинизации 600–7000 °С и время выдержки (созревания) 24–48 часов обеспечивают высокую степень кристалличности. При температуре гидротермальной кристаллизации 80–1000 °С образуются в основном цеолиты типа LTA и NaA, а при более высоких температурах — цеолиты типа FAU и NaX [12; 14].

Гидротермальный синтез является одним из наиболее эффективных и широко применяемых методов получения микропористых адсорбентов из каолина [11]. При использовании данного метода каолин предварительно прокаливается с переводением в высокореакционноспособный метакаолин, после чего в щелочной среде при определенных температурах и давлении осуществляется гидротермальная кристаллизация. В результате образуются цеолитные материалы с упорядоченной микропористой алюмосиликатной структурой [2; 20].

Синтез микропористых цеолитных адсорбентов начинается с этапа измельчения и обогащения природного каолина. Обогащенный каолин прокаливается при температуре 650–700 °С и переводится в фазу метакаолина. Полученный метакаолин смешивается с раствором NaOH до гомогенного состояния. Образовавшийся алюмосиликатный гель перед высокотемпературной гидротермальной кристаллизацией выдерживается (созревает) при комнатной температуре в течение определенного времени с целью формирования центров кристаллизации. Выдержанная смесь подвергается гидротермальной кристаллизации в автоклаве при температуре 80–120 °С. По завершении синтеза полученный осадок промывается дистиллированной водой до нейтрального значения pH среды, фильтруется и высушивается, в результате чего получается микропористый цеолитный адсорбент с высокой удельной поверхностью. Каждый из этих этапов напрямую влияет на кристаллическую структуру, объем пор и адсорбционные свойства образующегося цеолита [11; 12].

Концентрация NaOH определяет скорость растворения и перекристаллизации алюмосиликатов. В большинстве исследований раствор 2–4 М NaOH отмечается как наиболее оптимальная щелочная среда для синтеза цеолитов типов LTA и NaX [18; 11]. Вместе с тем температура гидротермальной кристаллизации также определяет тип синтезируемого цеолита. В интервале температур 80–1200 °С зафиксировано образование цеолитов типов LTA и FAU с высокой степенью кристалличности [7]. Время кристаллизации обычно составляет 12–48 часов. Увеличение продолжительности процесса может повысить степень кристалличности, однако чрезмерное увеличение времени может привести к образованию вторичных фаз.

Цеолиты, синтезированные на основе каолина, обладают удельной поверхностью 300–800 м²/г, высоким объемом микропор и катионообменной емкостью [23; 3; 22]. Они показывают высокую эффективность при адсорбции ионов тяжелых металлов (Pb²⁺, Cd²⁺, Cu²⁺), ионов аммония, органических красителей и фармацевтических загрязнителей [22; 24; 20].

Каолин Султунувайс как местный минеральный ресурс является одним из перспективных видов сырья для синтеза микропористых адсорбентов гидротермальным методом. Согласно анализу литературных источников, после перевода минерала каолинита в метакаолин при высокой температуре его реакционная способность резко возрастает, что дает возможность получать различные цеолитные структуры в щелочной среде [2; 14; 16; 17; 19; 24]. Поэтому глубокое изучение минералогического и химического состава местных каолинов, а также оценка их пригодности для гидротермального синтеза имеют важное научное и практическое значение. По данным литературы, соотношение SiO₂–и Al₂O₃ в составе природных каолинов, а также содержание кварца, оксидов железа и других минеральных примесей оказывают существенное влияние на фазу синтезируемого цеолита, степень его кристалличности и адсорбционные свойства [6; 9]. С этой точки зрения целесообразно оценить минералогический состав каолина Султунувайс с помощью современных методов исследования, таких как рентгенофазовый анализ (XRD), рентгенофлуоресцентный анализ (XRF), электронная микроскопия (SEM) и инфракрасная спектроскопия (FTIR).

Выбор оптимальных параметров гидротермального синтеза также имеет важное значение. В частности, путем оптимизации температуры прокаливания, концентрации щелочи, соотношения Si/Al, температуры и продолжительности кристаллизации можно получить цеолиты типов LTA, NaA, NaX или FAU с высокой степенью кристалличности [10; 11]. Это создает возможность производства высококачественных микропористых адсорбентов на основе местного каолина. Производство цеолитов из местного каолина имеет важное значение и с экономической точки зрения. Во-первых, создается возможность производства импортозамещающей продукции местными адсорбентами. Во-вторых, повышается уровень переработки местного минерального сырья с получением продукции с высокой добавленной стоимостью. В-третьих, появляется возможность производства эффективных сорбентов для очистки воды от ионов тяжелых металлов, аммония, красителей и других загрязнителей [20; 21]. Наряду с этим, местные цеолитные адсорбенты могут широко применяться в нефтегазовой, химической, пищевой, фармацевтической промышленности и промышленности строительных материалов, а также в технологиях очистки атмосферного воздуха и промышленных сточных вод [3; 10]. Это служит расширению производства импортозамещающей и экспортоориентированной продукции в республике. В целом, обзор литературы показывает, что каолин Султунувайс является перспективным местным минеральным сырьем для получения микропористых цеолитных адсорбентов на основе гидротермального синтеза. Проведение в дальнейшем экспериментальных исследований на основе данного каолина, определение оптимальных режимов процесса синтеза и комплексная оценка физико-химических и адсорбционных свойств полученных материалов являются важной научной задачей.

Заключение

Обзор литературы показал, что природный каолин является эффективным и экономически целесообразным минеральным сырьем для гидротермального синтеза микропористых алюмосиликатных адсорбентов. Прокаливание каолина до метакаолина и оптимизация параметров гидротермального синтеза имеют решающее значение для получения цеолитов с высокой степенью кристалличности. Синтезированные микропористые адсорбенты отличаются высокой удельной поверхностью, развитой структурой пор и катионообменной способностью, а также могут эффективно применяться при очистке водной и газовой сред, в катализе и других технологических процессах. Проанализированные научные источники подтверждают, что местный каолин Султанувайс является перспективным минеральным сырьем для производства цеолитных адсорбентов с высокой добавленной стоимостью путем гидротермального синтеза. В дальнейшем представляется целесообразным глубокое изучение минералогических особенностей данного каолина, разработка оптимальных технологических режимов синтеза и экспериментальная оценка адсорбционных свойств полученных материалов.

Список литературы

1. Alaba P.A., Sani Y.M., Daud W.M.A.W. Kaolin-based zeolite synthesis: A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2017. – Т. 78.
2. Babel S., Kurniawan T.A. Low-cost adsorbents for heavy metals uptake from contaminated water: A review // *Journal of Hazardous Materials*. – 2003. – Т. 97, № 1.
3. Belviso C. State-of-the-art applications of natural zeolites // *Minerals*. – 2020. – Т. 10, № 7. – Art. 624. – P. 1–18.
4. Breck D.W. *Zeolite Molecular Sieves: Structure, Chemistry and Use*. – New York: John Wiley & Sons, 1974. – 771 P.
5. Čejka J., Corma A., Zones S. *Zeolites and Catalysis: Synthesis, Reactions and Applications*. – Weinheim: Wiley-VCH, 2010. – 864 P.
6. Chandrasekhar S., Pramada P.N. Synthesis of zeolite A from metakaolin // *Applied Clay Science*. – 2008. – Т. 41, № 1.
7. Cundy C.S., Cox P.A. The hydrothermal synthesis of zeolites // *Microporous and Mesoporous Materials*. – 2005. – Т. 82, № 1.
8. Cundy C.S., Cox P.A. The hydrothermal synthesis of zeolites: History and development from the earliest days to the present time // *Chemical Reviews*. – 2003. – Т. 103, № 3.
9. Eshmetov I.D., Abdurakhimov S.A., Rakhimov E.B. Production of effective adsorbents based on local mineral raw materials and their application in purification processes // *Uzbek Chemical Journal*. – 2021. – № 3.
10. Fayzullaev N.I., Mamadoliev I.I. Obtaining high-silicon zeolites from kaolin // *Universum: технические науки*. – 2020. – № 10.

11. Fayzullaev N.I., Mamadoliev I.I., Pardaeva S.B. Synthesis of High Silicon Zeolites From Kaolin and Bentonite // Technological Advancement in Industrial and Intellectual Research. – 2021. – T. 2, № 1.
12. Flanigen E.M. Zeolites and molecular sieves: An historical perspective // Studies in Surface Science and Catalysis. – 2001. – T. 137.
13. Hartati H., Nur H., Mohamad H. Synthesis of zeolites from natural kaolin: A review // Materials Today: Proceedings. – 2020. – T. 31.
14. He H., Guo J., Xie X. Thermal activation of kaolinite into metakaolin and its structural evolution // Applied Clay Science. – 2013. – T. 73.
15. Johnson E.B.G., Arshad S.E. Hydrothermally synthesized zeolites based on kaolinite: A review // Applied Clay Science. – 2014. – T. 97.
16. Kucharov H.H., Rakhmatov A.M., Zhuraev U.O. Enrichment of local kaolins and study of their physicochemical properties // Chemistry and chemical technology. – 2022. – № 2.
17. Mozgawa W. The influence of structure on FTIR spectra of zeolites // Journal of Molecular Structure. – 2001. – T. 596, № 1.
18. Murray H.H. Applied clay mineralogy: Occurrences, processing and application of kaolins // Developments in Clay Science. – 2007. – T. 2. – P. 85–109.
19. Ouki S.K., Kavannagh M. Treatment of metals-contaminated wastewaters using natural zeolites // Water Science and Technology. – 1997. – T. 35, № 7.
20. Rakhimov A.A., Sodikov M.M. Synthesis of zeolites from aluminosilicate raw materials and determination of their sorption capacity // Reports of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan. – 2023. – № 4.
21. Visa M. Synthesis and characterization of new zeolite materials obtained from fly ash for heavy metals removal // Powder Technology. – 2016. – T. 294.
22. Wang S., Peng Y. Natural zeolites as effective adsorbents in water and wastewater treatment // Chemical Engineering Journal. – 2010. – T. 156, № 1.
23. Zdretsov I., Gerasimov A. Hydrothermal synthesis of zeolites from kaolin: Recent advances and future prospects // Ceramics International. – 2024. – T. 50, № 10.
24. Zhang Y., Wang J., Li H. Adsorption of ciprofloxacin from aqueous solution using zeolite A synthesized from kaolin // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2024. – T. 12, № 1. – Art. 111820.

Статья поступила в редакцию: 23.08.2026

Статья принята к публикации: 28.08.2026

Статья опубликована: 07.09.2026

УДК 666.3: 665.6.033

DOI: 10.32743/UniChem.2026.147.9.23343

**Физико-химические и минералогические свойства нефтяного шлама и
возможность его применения в керамическом производстве**

Хокимов Абдулазиз Эргашали угли

д-р техн. наук (PhD)

ассистент кафедры Химической инженерии, Ферганский государственный технический
университет

Республика Узбекистан, г. Фергана

E-mail: abdulaziz_xokimov@fstu.uz

Эминов Ашраф Мамурович

д-р техн. наук (DSc)

проф., зав. кафедрой Химические технологии Янгиерский филиал Ташкентского химико-
технологического института

Республика Узбекистан, г. Янгиер

Хамдамова Шохида Шерзодовна

д-р техн. наук (DSc)

проф. кафедры Химической инженерии, Ферганский государственный технический
университет

Республика Узбекистан, г. Фергана

Мирсалимова Саодат Рахматжановна

канд. хим. наук, проф.

кафедры Химической инженерии Ферганский государственный технический университет

Республика Узбекистан, г. Фергана

Мирзаев Наврузбек Абдуллаевич

д-р техн. наук (PhD)

и.о. доцента кафедры Химической инженерии Ферганский государственный технический
университет

Республика Узбекистан, г. Фергана

Physicochemical and mineralogical properties of oil sludge and the possibility of its application in ceramic production

Khokhimov Abdulaziz Ergashali ugli

PhD in Technical Sciences, Assistant Professor

Department of Chemical Engineering, Fergana State Technical University

Republic of Uzbekistan, Fergana

Eminov Ashraf Mamurovich

DSc in Technical Sciences, Professor

Head of the Department of Chemical Technologies, Yangiyer Branch of Tashkent Institute of

Chemical Technology

Republic of Uzbekistan, Yangiyer

Khamdamova Shokhida Sherzodovna

DSc in Technical Sciences, Professor

Department of Chemical Engineering, Fergana State Technical University

Republic of Uzbekistan, Fergana

Mirsalimova Saodat Rakhmatjanovna

candidate of Chemical Sciences, Professor

Department of Chemical Engineering, Fergana State Technical University

Republic of Uzbekistan, Fergana

Mirzayev Navruzbek Abdullaevich

PhD in Technical Sciences, Associate Professor

Department of Chemical Engineering, Fergana State Technical University

Republic of Uzbekistan, Fergana

Аннотация

В статье представлены результаты исследования физико-химических, гранулометрических и минералогических характеристик нефтяного шлама, образующегося на Ферганском нефтеперерабатывающем заводе, с целью оценки возможности его использования в производстве строительных керамических материалов. Исследование направлено на переработку и рациональное использование нефтяного шлама в качестве техногенного сырья, что позволяет одновременно снизить объём промышленных отходов и расширить сырьевую базу керамического производства. Определён компонентный состав нефтяного шлама, согласно которому содержание воды составляет 30,0 – 40,0 мас. %, механических примесей — 10,0 – 15,0 мас. %, органических компонентов — 45,0 – 60,0 мас. %. Для механических примесей после сушки и прокаливания определён химический состав, проведены гранулометрический, рентгенофазовый и инфракрасный спектроскопический анализы. Установлено повышенное содержание SiO_2 , Fe_2O_3 , CaO и MgO в составе механических примесей. Минералогический анализ показал наличие кварца, кальцита, CaO , CaSO_4 , паргасита, гематита и фаялита в зависимости от условий термической обработки. Методом FTIR исследованы изменения функциональных групп нефтяного шлама при температурах 150 – 650 °C. Установлено существенное снижение интенсивности полос, связанных с органическими компонентами, с повышением температуры и их практически

Библиографическое описание: Физико-химические и минералогические свойства нефтяного шлама и возможность его применения в керамическом производстве // Universum: химия и биология : электрон. научн. журн. Хокимов А.Э.У. [и др.]. 2026. 9(147). URL: <https://7universum.com/ru/nature/archive/item/23343>

полное исчезновение при 500 – 650 °С. Полученные результаты подтверждают перспективность использования нефтяного шлама в качестве техногенного компонента и порообразующей добавки при разработке керамических строительных материалов.

Abstract

This article presents the results of a study of the physicochemical, granulometric, and mineralogical characteristics of oil sludge generated at the Fergana Oil Refinery, with the aim of assessing its potential use in the production of construction ceramic materials. The study focuses on the processing and rational utilization of oil sludge as technogenic raw material, which can simultaneously reduce the volume of industrial waste and expand the raw material base for ceramic production. The component composition of the oil sludge was determined, showing that the water content was 30.0 – 40.0 wt.%, mechanical impurities accounted for 10.0 – 15.0 wt.%, and organic components constituted 45.0 – 60.0 wt.%. The chemical composition of the mechanical impurities was determined after drying and calcination, and granulometric, X-ray diffraction, and infrared spectroscopic analyses were performed. An increased content of SiO₂, Fe₂O₃, CaO, and MgO was established in the mechanical impurities. Mineralogical analysis revealed the presence of quartz, calcite, CaO, CaSO₄, pargasite, hematite, and fayalite, depending on the thermal treatment conditions. Changes in the functional groups of the oil sludge at temperatures of 150 – 650 °C were investigated by FTIR spectroscopy. A significant decrease in the intensity of absorption bands associated with organic components was observed with increasing temperature, with their almost complete disappearance at 500 – 650 °C. The obtained results confirm the potential of oil sludge as a technogenic component and pore-forming additive in the development of construction ceramic materials.

Ключевые слова: нефтяной шлам, керамические материалы, минеральный состав, термическая обработка, FTIR-спектроскопия.

Keywords: oil sludge, ceramic materials, mineral composition, thermal treatment, FTIR.

Введение

В настоящее время производство керамических материалов в современной строительной промышленности признано важной стратегической отраслью, которая не только обеспечивает потребности строительного сектора, но и оказывает значительное влияние на развитие инновационных направлений в экономике страны [6, 8].

Важным направлением ресурсосбережения при производстве строительных керамических материалов является использование наряду с природным сырьём промышленных техногенных отходов таких отраслей, как углеперерабатывающая и металлургическая промышленность [2]. Комплексное использование природного и техногенного сырья позволяет увеличить объём производства продукции на 25 – 30 %. Экономическая эффективность использования техногенного сырья определяется, прежде всего, отсутствием необходимости дополнительных затрат на добычу сырья. В настоящее время в мире зарегистрировано более 1000 видов техногенных продуктов, рассматриваемых в качестве перспективного вторичного сырья, из которых 780 представлены в информационных базах данных, однако на практике утилизируется лишь около 60 видов.

Пористые керамические материалы в основном получают из легкоплавкого природного глинистого сырья с добавлением различных порообразующих компонентов. Вопрос использования промышленных отходов вместо природных компонентов по-прежнему остаётся актуальным [4, 5].

Анализ литературных источников показывает, что авторы [3] предлагают добавлять в шихту для производства керамзита буровой шлам или осадок, образующийся при очистке воды, что способствует улучшению физико-механических свойств керамзита.

В исследованиях, проведённых учёными, изучена возможность получения лёгких строительных кирпичей на основе отходов нефтеперерабатывающей промышленности (НПЗ) и производства оливкового масла (ПОМ). Установлено, что добавление 3 – 5 % отходов НПЗ или 10 % отходов ПОМ не оказывает существенного влияния на качество кирпича, тогда как увеличение их содержания приводит к снижению плотности, повышению водопоглощения и, как следствие, снижению прочности при сжатии. Отмечено, что выгорание органических веществ способствует образованию пор и позволяет снизить энергозатраты. Вместе с тем испытания на токсичность показали, что степень выщелачивания тяжёлых металлов из всех исследованных образцов соответствует установленным нормативным требованиям [7].

В другом исследовании [9] изучена эффективность обезвреживания нефтяных шламов методом тлеющего горения. Согласно полученным результатам, после переработки объём твёрдого остатка значительно уменьшился, углеводороды были удалены, а из состава конденсата выделены вода и топливные фракции. Неконденсируемые газы в основном состояли из H_2 , CO и H_2S , в связи с чем отмечена необходимость их дополнительной очистки. Результаты исследования свидетельствуют о высокой эффективности процесса тлеющего горения, а также о его дополнительном потенциале для использования в качестве источника возобновляемой энергии.

Кроме того, В.З.Абдрахимовым [1] были исследованы возможности использования нефтяных шламов, являющихся отходами нефтяной промышленности, в производстве керамических материалов. В исследовании показано, что благодаря высокой теплотворной способности ($Q > 2500$ ккал/кг) и повышенному содержанию углерода ($C > 10$ %) нефтяные шламы могут эффективно использоваться не только в качестве разжижающей, но и в качестве топливной добавки. Поскольку при использовании 100 % бентонитовой глины наблюдалось образование трещин в готовых изделиях, в качестве оптимального состава была выбрана смесь с добавлением 50 % нефтяного шлама. Полученные на основе данного состава лёгковесные керамические кирпичи характеризуются высокой теплотехнической эффективностью и рекомендуются в качестве перспективных строительных материалов.

Материалы и методы

Для изучения химико-минералогического состава сырья, фазовых превращений, происходящих в процессе обжига, а также микроструктуры исследуемых образцов были использованы методы химического, рентгенофазового и ИК-спектроскопического анализа.

Химический анализ. При проведении химического анализа различных материалов в основном достаточно определить содержание следующих оксидов: SiO_2 , Al_2O_3 , $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$, CaO , MgO , Na_2O , K_2O , SO_3 , а также потери массы при прокаливании (ППП). Химический анализ образцов проводили в соответствии с ГОСТ 2642.0-2014.

Рентгенофазовый анализ. Для определения кристаллических фаз использованного сырья и синтезированных образцов применяли дифрактометры LABX XRD-6100 SHIMADZU (Япония) и Rigaku MiniFlex 600 (Япония). Рентгенофазовый анализ проводили с использованием $\text{CuK}\alpha$ -излучения (Ni-фильтр, длина волны 1,5418 Å) при силе тока 30 мА и напряжении 30 кВ. Скорость вращения детектора составляла 4°/мин при шаге 0,02° в единицах $\omega/2\theta$, диапазон углов сканирования составлял от 4 до 80°.

Инфракрасный спектральный анализ. Исходные и синтезированные образцы исследовали методом Фурье-ИК-спектроскопии (FTIR) на приборе IRSpirit-T в диапазоне волновых чисел 400-4000 см^{-1} .

Результаты и обсуждения

Нефтяной шлам Ферганского нефтеперерабатывающего завода. В настоящее время промышленные отходы, образующиеся в результате различных производственных процессов во всём мире, приводят к ухудшению состояния окружающей среды. В частности, на нефтеперерабатывающих предприятиях накапливаются значительные объёмы нефтяных шламов, при этом уровень их утилизации и повторного использования остаётся недостаточно высоким, что приводит к увеличению объёмов отходов нефтепродуктов в накопительных ёмкостях. Актуальность данной экологической проблемы обуславливает необходимость переработки этих отходов и их дальнейшего использования в экономически целесообразных направлениях.

В связи с этим целью настоящего исследования являлась утилизация нефтяного шлама, образующегося на Ферганском нефтеперерабатывающем заводе в процессе отделения воды от нефти, путём его введения в состав строительных керамических материалов, что позволит одновременно снизить негативное воздействие отходов на окружающую среду и повысить эффективность их использования. В условиях Ферганского нефтеперерабатывающего завода ежегодно образуется около 7,0 – 8,0 тыс. тонн нефтяного шлама, что составляет примерно 3 – 5 кг на каждую тонну переработанных нефтепродуктов.

В нефтяном шламе были определены содержание воды, механических примесей и органических компонентов. Полученные результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Компонентный состав нефтяного шлама

T/r	Компонент	Содержание, мас. %
1	Содержание воды	30,0-40,0
2	Механические примеси	10,0-15,0
3	Органические компоненты	45,0-60,0

Согласно результатам, представленным в таблице 1, установлено, что содержание воды в нефтяном шламе составляет 30,0 – 40,0 мас. %, механических примесей — 10,0 – 15,0 мас. %, а органических компонентов — 45,0 – 60,0 мас. %. Кроме того, был определён химический состав механических примесей, содержащихся в нефтяном шламе, после их сушки при температуре 150 °С и прокаливания при 1000 °С (таблица 2). Полученные результаты показали, что в составе высушенных механических примесей наблюдается повышенное содержание оксидов кремния, железа, кальция и магния (SiO_2 – 13,05 %, Fe_2O_3 – 10,91 %, CaO – 25,34 %, MgO – 7,57 %), тогда как после прокаливания содержание оксидов кальция и магния значительно увеличивается (CaO – 40,06 %, MgO – 10,08 %).

Таблица 2.

Химический состав механических примесей, содержащихся в нефтяном шламе

Наименование образца	Оксиды, мас. %									ППП, мас. %
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3	
Высушенный образец	13.05	3.30	10.91	0.13	25.34	7.57	0.37	0.25	4.38	36.40
Прокалённый образец при 1000 °С	13.48	3.47	10.47	0.10	40.06	10.08	0.40	0.10	9.81	11.24

Гранулометрический состав высушенных механических примесей, содержащихся в нефтяном шламе, был определён экспериментальным методом. Полученные результаты представлены в таблице 3.

По результатам определения гранулометрического состава высушенных механических примесей, содержащихся в нефтяном шламе, модуль крупности их частиц был определён в соответствии с ГОСТ 8735 – 88 на основании расчётных уравнений, приведённых в разделе 2.1.

Таблица 3.

Гранулометрический состав высушенных механических примесей, содержащихся в нефтяном шламе

Размер ячеек сита, мм	Размер ячеек сита и остаток на сите, г /%						
	0,063	0,1	0,16	0,315	0,63	1,25	2,5
Остаток на сите, г	21,55	11,05	17,68	14,91	9,94	10,50	10,50
Остаток на сите, %	21,55	11,05	17,68	14,91	9,94	10,50	10,50
Сум. остаток A_p , %	96,13	74,58	63,53	45,85	30,94	21,00	10,50

*Доля материала, прошедшего через сито с размером ячеек 0,063 мм, составляет 3,87 %.

Результаты расчёта модуля крупности частиц высушенного нефтяного шлама показали, что по данному показателю он относится к классу мелких песков.

$$Mk = \frac{A_{2,5} + A_{1,25} + A_{0,63} + A_{0,315} + A_{0,16}}{100} = \frac{10,5 + 21 + 30,94 + 45,85 + 63,53}{100} = 1,72$$

Также был определён минеральный состав механических примесей, содержащихся в нефтяном шламе, после сушки при температуре 150 °С и прокаливания при температуре 1000 °С. Полученные результаты представлены на рисунках 1 и 2

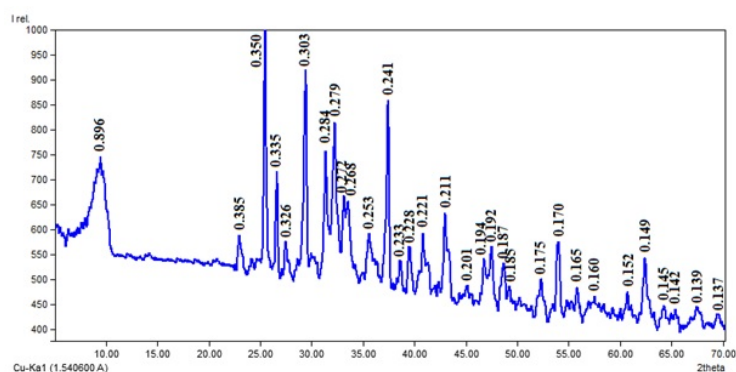


Рисунок 1. Рентгенограмма высушенных механических примесей, содержащихся в нефтяном шламе

Минеральный состав высушенных механических примесей, содержащихся в нефтяном шламе, представлен минералами CaSO_4 , кварцем, кальцитом, известью, паргаситом и гематитом

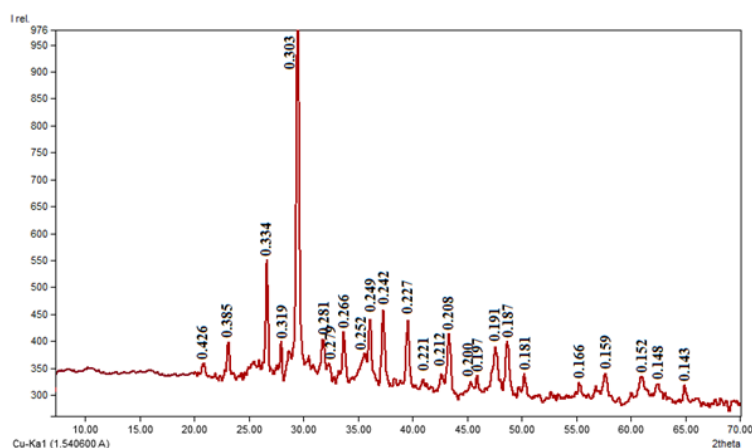


Рисунок 2. Рентгенограмма прокалённого при температуре 1000 °С образца высушенных механических примесей, содержащихся в нефтяном шламе

В минеральном составе высушенных механических примесей, содержащихся в нефтяном шламе, после прокаливании при температуре 1000 °С были выявлены следующие минералы: кварц, кальцит, CaO и фаялит.

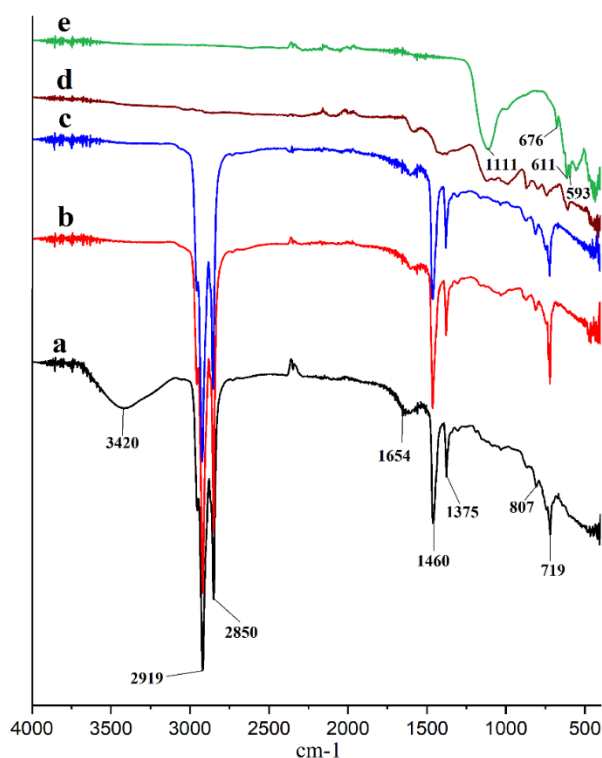


Рисунок 3. ИК-спектрограммы исходного нефтяного шлама и образцов, подвергнутых термической обработке при температурах 150-650 °С

а) исходный нефтяной шлам б) 150°С в) 300°С г) 500°С д) 650°С

На рисунке 3 представлены результаты ИК-спектроскопического анализа исходного нефтяного шлама (а) и образцов после его термической обработки в диапазоне температур 150-650 °С (б-е). На спектрограмме широкая полоса поглощения при 3420 см⁻¹ соответствует колебаниям групп –ОН, тогда как выраженные полосы при 2919 и 2850 см⁻¹ относятся к валентным колебаниям связей С-Н в углеводородах, что свидетельствует о высоком содержании органических веществ в исходном шламе. Полосы поглощения в области 1654, 1460 и 1375 см⁻¹ соответствуют колебаниям ароматических или алифатических соединений и групп С=О.

Полосы поглощения при 807 и 719 см⁻¹ характерны для силикатных фаз, входящих в минеральный состав материала. С повышением температуры (б-е) интенсивность полос, обусловленных органическими группами, значительно снижается. Особенно при 500 °С (г) и 650 °С (е) наблюдается исчезновение полос, соответствующих С-Н и -ОН группам, что свидетельствует о полном разложении углеводородов. Одновременно выявлено появление новых полос поглощения в области 1111, 676, 611 и 593 см⁻¹. В целом результаты ИК-спектроскопического анализа наглядно демонстрируют происходящие под воздействием температуры процессы разложения органических веществ в нефтяном шламе, удаления структурных гидроксильных групп и стабилизации оксидных структур твёрдой фазы.

Заключение

Установлено, что нефтяной шлам Ферганского нефтеперерабатывающего завода содержит значительное количество органических веществ и минеральных компонентов, в связи с чем может быть использован в качестве порообразующей добавки в процессе обжига.

На основании полученных данных установлена возможность разработки составов керамических материалов, таких как кирпич и пористые заполнители, на основе Шорсувской глины, барханного песка и нефтяного шлама, физико-механические и технологические свойства которых соответствуют предъявляемым требованиям.

Список литературы

1. Абдрахимов В.З. Использование многотоннажного нефтяного шлама как вторичное сырье в производстве легковесного кирпича на основе бентонитовой глины. Экологические системы и приборы. 2025. – С. 24–33.
2. Воробьева В.В., Леонов В.Г. Ресурс- и энергосбережение в производстве строительной стеновой керамики // Известия ТулГУ. Естественные науки. – 2014.
3. Гурьева В.А., Дорошин А.В. К вопросу о производстве керамзита из техногенных отходов западного Оренбуржья // Молодой ученый. – 2017. – № 21.
4. Роговой М.И. Технология искусственных пористых заполнителей и керамики. Учебник. М. – 2016. – 319 с.
5. Шакиров Т.Т. Технология получения пористого заполнителя из кварцевого порфира и отхода угледобычи для легкого бетона: монография. – Ташкент: «Umid Design», 2023. – 146 с.
6. Chaolu Y., Fuchuan Z., Qianren Ch., Gang Sh., Masiko K., Masabo G. Development and application of modern building ceramic materials // Research and Application of Materials Science. – 2023. – Т. 5, № 2.
7. Eliche-Quesada D., Azevedo-Da Cunha R., Corpas-Iglesias F.A. Eliche-Quesada D., Azevedo-Da Cunha R., Corpas-Iglesias F.A. Effect of sludge from oil refining industry or sludge from pomace oil extraction industry addition to clay ceramics, Applied Clay Science // Applied Clay Science. – 2015. – Т. 114.
8. Yan Z., Gao Y., Zhang H. Materials development and potential applications of ceramics: new opportunities and challenges. Appl. Sci. 2023, 13 (19), 10957.
9. Zhao Ch., Li Y., Gan Z., Nie M. Method of smoldering combustion for refinery oil sludge treatment // Journal of Hazardous Materials. – 2021. – Т. 409.

References

1. Abdrakhimov V.Z. [Use of large-tonnage oil sludge as secondary raw material in the production of lightweight bricks based on bentonite clay]. Ekologicheskie sistemy i pribory, 2025, P. 24–33. (In Russ.)

2. Vorob'eva V.V., Leonov V.G. [Resource and energy conservation in the production of building wall ceramics]. *Izvestiya TulGU. Estestvennye nauki*, 2014, Iss. 1, Part 2, P. 80–88. (In Russ.)
3. Gur'eva V.A., Doroshin A.V. Gur'eva V.A., Doroshin A.V. [On the production of expanded clay from technogenic waste of Western Orenburg region]. *Molodoy uchenyy*, P // *Molodoy uchenyy*. – 2017. – № 21. (In Russ.)
4. Rogovoy M.I. [Technology of artificial porous aggregates and ceramics]. Moscow, 2016. 319 P. (In Russ.)
5. Shakirov T.T. [Technology for producing porous aggregate from quartz porphyry and coal-mining waste for lightweight concrete]. Tashkent: Umid Design, 2023. 146 P. (In Russ.)
6. Chaolu Y., Fuchuan Z., Qianren Ch., Gang Sh., Masiko K., Masabo G. Development and application of modern building ceramic materials. *Research and Application of Materials Science*, 2023, Vol. 5, No. 2, P. 25–32.
7. Eliche-Quesada D., Azevedo-Da Cunha R., Corpas-Iglesias F.A. Eliche-Quesada D., Azevedo-Da Cunha R., Corpas-Iglesias F.A. Effect of sludge from oil refining industry or sludge from pomace oil extraction industry addition to clay ceramics. *Applied Clay Science*, p // *Applied Clay Science*. – 2015. – T. 114.
8. Yan Z., Gao Y., Zhang H. Materials development and potential applications of ceramics: new opportunities and challenges. *Applied Sciences*, 2023, Vol. 13, No. 19, 10957.
9. Zhao Ch., Li Y., Gan Z., Nie M. Method of smoldering combustion for refinery oil sludge treatment // *Journal of Hazardous Materials*. – 2021. – T. 409.

ОРГАНИЧЕСКАЯ ХИМИЯ

Статья поступила в редакцию: 25.08.2026

Статья принята к публикации: 30.08.2026

Статья опубликована: 07.09.2026

УДК 547.26+547.56

Фотоинициированный синтез пропилового тиовинилового эфира на основе 1-гексина

Эркинов Расулжон Бахтиёр угли

докторант

Наманганский государственный технический университет

Республика Узбекистан, г. Наманган

Солиев Махаммаджон Исматуллаевич

проф. кафедры химии

Наманганский государственный технический университет

Республика Узбекистан, г. Наманган

E-mail: muhammadbey@mail.ru

Нурманов Сувонкул Эрхонович

проф. кафедры органической и нефтегазовой химии

Национальный университет Узбекистана

Республика Узбекистан, г. Ташкент

E-mail: nurmonov_se@mail.ru

Photoinitiated synthesis of a propyl thiovinyl ether from 1-hexyne

Erkinov Rasuljon Bakhtiyor ugli

Doctoral Researcher

Namangan State Technical University

Republic of Uzbekistan, Namangan

Soliev Makhammadjon Ismatullaevich

professor

Department of Chemistry Namangan State Technical University

Republic of Uzbekistan, Namangan

Nurmanov Suvonkul Erkhonovich

professor

Department of Organic and Petroleum Chemistry, National University of Uzbekistan

Republic of Uzbekistan, Tashkent

Библиографическое описание: Эркинов Р.Б.У., Солиев М.И., Нурманов С.Э. Фотоинициированный синтез пропилового тиовинилового эфира на основе 1-гексина // Universum: химия и биология : электрон. научн. журн. 2026. 9(147). URL: <https://7universum.com/ru/nature/archive/item/23352>

Аннотация

В работе рассмотрено присоединение 1-пропантиола к 1-гексину при ультрафиолетовом облучении. Исходные вещества брали в эквимольных количествах; фотоинициатором служил 2,2-диметокси-2-фенилацетофенон, содержание которого составляло 1,0 мол.%. Опыты проводили в атмосфере азота при 25–35 °C; длина волны излучения составляла 365 нм, интенсивность — 6 мВт/см². Продолжительность облучения изменяли от 10 до 90 мин. Через 60 мин конверсия 1-гексина достигала 89,0 %, а выход целевого продукта с учетом его хроматографической чистоты — 87,0 %. Из 0,8200 г 1-гексина и 0,7602 г 1-пропантиола выделено 1,3960 г фракции с содержанием основного вещества 98,5 %, что соответствует 1,3751 г гекс-1-ен-1-ил(пропил)сульфана. Строение полученного соединения охарактеризовано по ИК-спектру и спектрам ¹H и ¹³C ЯМР. Винильным протонам отвечают сигналы 6,03 и 5,55 м.д., атомам углерода двойной связи — 131,96 и 131,31 м.д. По результатам лабораторного опыта рассчитан расход основных реагентов на 100 кг выделенной фракции: 58,739 кг 1-гексина, 54,456 кг 1-пропантиола и 1,833 кг фотоинициатора. Материалоемкость по этим компонентам составляет 1,150 кг/кг при теоретической атомной экономичности реакции 100 %.

Abstract

The addition of 1-propanethiol to 1-hexyne under ultraviolet irradiation is considered in this work. The starting materials were taken in equimolar quantities; 2,2-dimethoxy-2-phenylacetophenone, the content of which was 1.0 mol.%, served as a photoinitiator. The experiments were carried out in a nitrogen atmosphere at 25–35 °C; the radiation wavelength was 365 nm, and the intensity was 6 mW/cm². The irradiation duration was varied from 10 to 90 min. After 60 min, the conversion of 1-hexyne reached 89.0 %, and the yield of the target product, taking into account its chromatographic purity, was 87.0 %. From 0.8200 g of 1-hexyne and 0.7602 g of 1-propanethiol, 1.3960 g of a fraction with a main substance content of 98.5 % were isolated, which corresponds to 1.3751 g of hex-1-en-1-yl(propyl)sulfane. The structure of the obtained compound was characterized by the IR spectrum and the ¹H and ¹³C NMR spectra. The vinyl protons are indicated by signals at 6.03 and 5.55 ppm, and the double bond carbon atoms are indicated by signals at 131.96 and 131.31 ppm. Based on the laboratory experiment results, the consumption of the main reagents per 100 kg of the isolated fraction was calculated: 58.739 kg of 1-hexyne, 54.456 kg of 1-propanethiol, and 1.833 kg of photoinitiator. The material consumption for these components is 1.150 kg/kg with a theoretical atomic efficiency of the reaction of 100 %.

Ключевые слова: тиол-ин реакция, тиовиниловый эфир, 1-гексин, 1-пропантиол, фотоиницирование, винилсульфид.

Keywords: thiol-yne reaction, thiovinyl ether, 1-hexyne, 1-propanethiol, photoinitiation, vinyl sulfide.

Введение

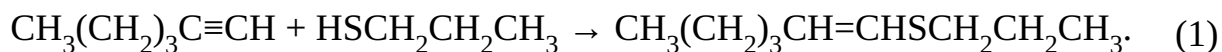
Присоединение тиолов к непредельным соединениям является атомно-экономичным способом образования связи C–S [5–7]. Особый интерес представляют тиол-ин реакции: после однократного присоединения тиола к алкину в продукте сохраняется двойная связь и образуется функциональный винилсульфид. Разработка управляемых способов остановки реакции на этой стадии актуальна, поскольку избыток тиола или чрезмерное облучение способны вызвать повторное присоединение и снизить селективность по целевому продукту.

Сохранившаяся связь C=C позволяет подвергать винилсульфиды дальнейшему присоединению, окислению, галогенированию и полимеризационной модификации. Поэтому они рассматриваются как интермедиаты органического синтеза и строительные блоки для функциональных мономеров, фотоактивных систем и серосодержащих полимеров [8; 10]. Практическое применение гекс-1-ен-1-ил(пропил)сульфана потребует отдельных испытаний его реакционной способности и свойств в целевых композициях.

Цель работы состояла в выборе рациональной продолжительности фотоинициированного синтеза гекс-1-ен-1-ил(пропил)сульфана при 365 нм, подтверждении его строения спектральными методами и разграничении конверсии, хроматографической чистоты и выхода с составлением материального баланса.

Материалы и методы

Исходными веществами служили 1-гексин C_6H_{10} ($M = 82,15$ г/моль) и 1-пропантиол C_3H_8S ($M = 76,16$ г/моль). Для инициирования реакции использовали 2,2-диметокси-2-фенилацетофенон (DMPA; $M = 256,30$ г/моль). При присоединении реагентов в соотношении 1:1 образуется винилсульфид $C_9H_{18}S$ с молярной массой 158,31 г/моль:



В реакционную колбу вместимостью 25 мл загружали 0,8200 г 1-гексина и 0,7602 г 1-пропантиола. Эти количества соответствуют 9,9817 ммоль каждого вещества. Затем добавляли 0,0256 г DMPA, то есть 1,0 мол.% относительно 1-гексина. Перед облучением через систему пропускали около 500 мл азота, чтобы уменьшить влияние кислорода на радикальное превращение.

Реакционную смесь облучали при 365 нм; интенсивность излучения составляла 6 мВт/см². Температура во время опыта находилась в пределах 25–35 °С. В основной серии продолжительность облучения составляла 60 мин, в сравнительных опытах ее изменяли от 10 до 90 мин. Состав реакционной смеси и чистоту выделенной фракции определяли методом газовой хроматографии с пламенно-ионизационным детектированием на приборе «Хроматэк-Кристалл ВП 9000/CR-5». ИК-спектр регистрировали на Фурье-ИК-спектрометре IRTracer-100 в диапазоне 4000–400 см^{–1}. Спектры ¹H и ¹³C ЯМР получали на спектрометре JNM-ECZ600R (600 и 150 МГц соответственно) в CDCl₃; химические сдвиги приведены в м.д. Эти методы использовали совместно: ГХ-ПИД — для расчета конверсии и чистоты, ИК- и ЯМР-спектроскопию — для подтверждения строения продукта.

Конверсию рассчитывали по уменьшению количества исходного 1-гексина. При определении выхода учитывали не только массу выделенной фракции, но и содержание в ней основного компонента. Такой расчет позволяет разграничить массу полученного образца и массу собственно целевого соединения:

$$m_{\text{чист}} = m_{\text{фр}} \times w_{\text{ГС}} / 100; Y = m_{\text{чист}} / (n_{\text{лим}} \times M_{\text{пр}}) \times 100 \%. \quad (2)$$

Здесь $m_{\text{чист}}$ — масса чистого целевого соединения; $m_{\text{фр}}$ — масса выделенной фракции; $w_{\text{ГС}}$ — содержание основного компонента по результатам газохроматографического анализа; $n_{\text{лим}}$ — количество лимитирующего реагента; $M_{\text{пр}}$ — молярная масса винилсульфида. В рассматриваемом опыте расчет вели по 1-гексину.

Результаты и обсуждение

Под действием излучения DMPA образует иницирующие радикалы, участвующие в превращении 1-пропантиола в тиольные частицы. Далее тиольный радикал присоединяется к тройной связи 1-гексина; перенос атома водорода приводит к образованию винилсульфида. Такая последовательность согласуется с общими представлениями о радикальном присоединении тиолов к алкинам [2; 5].

Для данной системы принципиально важно остановить превращение на стадии однократного присоединения. Избыток тиола либо чрезмерное облучение потенциально могут способствовать дальнейшему расходованию уже образовавшегося винилсульфида. Поэтому исходные вещества брали в эквимольных количествах, а влияние времени рассматривали отдельно. Соотношение E/Z-изомеров в этой работе не определяли; приведенные результаты относятся к выделенному продукту без количественного разделения геометрических форм.

Таблица 1.

Влияние продолжительности облучения на тиол-ин реакцию

Время, мин	10	20	30	40	50	60	70	90
Конверсия, %	36	41	58	73	84	89	90	90
Выход, %	34	39	56	71	82	87	88	88

В первые 10 мин конверсия 1-гексина составила 36 %, тогда как выход выделяемого продукта достигал 34 %. Далее оба показателя возрастали, но не вполне равномерно. Наиболее заметное изменение наблюдалось между 20 и 50 мин: конверсия увеличилась с 41 до 84 %, а выход — с 39 до 82 %. Через 60 мин были получены соответственно 89 и 87 %.

Продление облучения до 70 мин дало лишь небольшое увеличение показателей — до 90 и 88 %. При дальнейшем увеличении продолжительности до 90 мин значения не изменились. В пределах рассмотренных условий 60-минутный режим представляется более удобным: он обеспечивает высокий выход без дополнительного расхода времени на незначительное увеличение количества продукта. Статистическую значимость различия между опытами на 60 и 70 мин отдельно не оценивали.

Количество 1-гексина, принятого за лимитирующий реагент, составляет $0,8200 / 82,15 = 0,0099817$ моль. При полном превращении это соответствует $0,0099817 \times 158,31 = 1,5802$ г винилсульфида. Фактически выделено 1,3960 г фракции, в которой на основной компонент приходится 98,5 %:

$$m_{\text{чист}} = 1,3960 \times 0,985 = 1,3751 \text{ г}; Y = 1,3751 / 1,5802 \times 100 = 87,0 \%. \quad (3)$$

Если пренебречь составом фракции и рассчитывать выход по всей ее массе, получится $1,3960 / 1,5802 \times 100 = 88,3 \%$. Эта величина относится к выделенному образцу в целом, а не к массе чистого винилсульфида. По этой причине в качестве выхода целевого соединения использовано значение 87,0 %. От конверсии 1-гексина, равной 89,0 %, его также следует отличать: расходование исходного вещества само по себе не означает количественного выделения продукта.

Расчетный баланс по основным компонентам лабораторного опыта имеет следующий вид (г): загружено 1-гексина — 0,8200, 1-пропантиола — 0,7602, DMPA — 0,0256; получено фракции продукта — 1,3960, расчетные остатки 1-гексина и 1-пропантиола составляют соответственно 0,0902 и 0,0836; на прочие компоненты и потери приходится 0,0360. Сумма по обеим частям равна 1,6058 г. Этот расчет характеризует основные органические компоненты и не включает азот, возможные вспомогательные растворители и материалы, используемые при выделении.

ИК-спектр, зарегистрированный на IRTracer-100, содержит полосы $3080\text{--}3020 \text{ см}^{-1}$, относимые к валентным колебаниям винильных связей C–H, и $2950\text{--}2850 \text{ см}^{-1}$, характерные для алифатических C–H. Поглощение в области $1640\text{--}1600 \text{ см}^{-1}$ согласуется с наличием связи C=C, а отсутствие полосы $\nu(\text{S–H})$ около $2550\text{--}2600 \text{ см}^{-1}$ указывает на расходование исходного тиола. В спектре ^1H ЯМР (JNM-ECZ600R, 600 МГц, CDCl_3) винильным протонам соответствуют сигналы δ 6,03 и 5,55 м.д., а сигнал δ 2,69 м.д. относится к группе $\text{CH}_2\text{--S}$. В спектре ^{13}C ЯМР (150 МГц, CDCl_3) сигналы δ 131,96 и 131,31 м.д. отвечают атомам углерода двойной связи, а δ 34,38 м.д. — атому углерода при сере. Газохроматографический анализ на приборе «Хроматэк-Кристалл ВП 9000/CR-5» показал содержание основного компонента 98,5 %. Совокупность ИК-, ЯМР- и ГХ-ПВД-данных подтверждает образование продукта однократного присоединения и согласуется со строением гекс-1-ен-1-ил(пропил)сульфана [3; 9].

Пересчет лабораторной загрузки на 100 кг выделенной фракции дает 58,739 кг 1-гексина, 54,456 кг 1-пропантиола и 1,833 кг DMPA. Суммарный расход указанных компонентов составляет 115,028 кг, или 1,150 кг на 1 кг фракции. Это расчетный показатель, полученный прямой пропорцией из лабораторного опыта; он не учитывает растворители, затраты на очистку и особенности работы фотохимического реактора в увеличенном масштабе.

Формальная атомная экономичность самой реакции равна $158,31 / (82,15 + 76,16) \times 100 \% = 100 \%$. Такая оценка относится только к стехиометрическому уравнению и не означает, что реальный процесс протекает без потерь. Для перехода к препаративному или производственному масштабу потребуются отдельные исследования распределения излучения, отвода теплоты и условий выделения продукта.

Заключение

При присоединении 1-пропантиола к 1-гексину под действием излучения 365 нм гекс-1-ен-1-ил(пропил)сульфан получен при 25–35 °С. Через 60 мин конверсия составила 89,0 %, а выход с учетом чистоты фракции — 87,0 %; продление опыта до 70 мин повышало выход лишь до 88,0 %. Строение и чистота продукта подтверждены данными ИК-, $^1\text{H}/^{13}\text{C}$ ЯМР-спектроскопии и ГХ-ПИД. Расход трех основных компонентов составляет 1,150 кг на 1 кг выделенной фракции. Сохранение двойной связи делает продукт перспективным интермедиатом последующей функционализации и потенциальным мономером серосодержащих материалов; конкретные применения требуют дальнейшей проверки.

Список литературы

1. Солиев М.И., Охундадаев А.К., Нурмонов С.Э., Абидов И. Реакция винилирования тимола с ацетиленом в супер-основной среде // *Universum: химия и биология*. – 2020. – № 10. URL: <https://7universum.com/ru/nature/archive/item/10763>.
2. Burykina J.V. et al. Selectivity control in thiol-yne click reactions via visible light induced associative electron upconversion // *Chem. Sci.* – 2020. – Т. 11. – DOI: 10.1039/D0SC01939A.
3. Cao J.-M. et al. Regioselective thiol-yne reaction of thiol with ((methyl- d_3)sulfonyl)ethyne: synthesis of (2-((methyl- d_3)sulfonyl)vinyl)sulfides // *J. Org. Chem.* – 2024. – Т. 89. – DOI: 10.1021/acs.joc.3c02100.
4. Chatterjee A., König B., Natarajan P. Visible-light-driven thiol-yne reaction: a practical synthesis of (1,2-diarylvinyl)(aryl/alkyl)sulfides // *ChemPhotoChem.* – 2020. – Т. 4. – DOI: 10.1002/cptc.201900266.
5. Fairbanks B.D. et al. Reaction rates and mechanisms for radical, photoinitiated addition of thiols to alkynes // *Macromolecules.* – 2010. – Т. 43. – DOI: 10.1021/ma1002968.
6. Hoyle C.E., Bowman C.N. Thiol-ene click chemistry // *Angew. Chem. Int. Ed.* – 2010. – Т. 49. – DOI: 10.1002/anie.200903924.
7. Kolb H.C., Finn M.G., Sharpless K.B. Click chemistry: diverse chemical function from a few good reactions // *Angew. Chem. Int. Ed.* – 2021. – Т. 40. – DOI: 10.1002/1521-3773(20010601)40:11<2004::AID-ANIE2004>3.0.CO;2-5.
8. Lossouarn A. et al. Metalloenzyme-mediated thiol-yne addition towards photoisomerizable fluorescent dyes // *Chem. Eur. J.* – 2022. – Т. 28. – DOI: 10.1002/chem.202202180.
9. Nador F. et al. Thiol-yne click reaction: an interesting way to derive thiol-provided catechols // *RSC Adv.* – 2022. – Т. 11. – DOI: 10.1039/D0RA09687C.
10. Williams C. et al. Synthesis of macrocyclic peptides via photochemical radical thiol-yne reaction // *J. Am. Chem. Soc.* – 2026. – Т. 148. – DOI: 10.1021/jacs.6c08113.

References

1. Soliev M.I. et al. [Reaction of thymol vinylation with acetylene in a superbasic medium]. *Universum: khimiya i biologiya*, 2020, no. 10(76). (In Russ.)

2. Burykina J.V. et al. Selectivity control in thiol–yne click reactions via visible light induced associative electron upconversion // *Chem. Sci.* – 2020. – Т. 11.
3. Cao J.-M. et al. Regioselective thiol-yne reaction of thiol with ((methyl-d₃)sulfonyl)ethyne: synthesis of (2-((methyl-d₃)sulfonyl)vinyl)sulfides // *J. Org. Chem.* – 2024. – Т. 89.
4. Chatterjee A., König B., Natarajan P. Visible-light-driven thiol-yne reaction: a practical synthesis of (1,2-diarylvinyl)(aryl/alkyl)sulfides // *ChemPhotoChem.* – 2020. – Т. 4.
5. Fairbanks B.D. et al. Reaction rates and mechanisms for radical, photoinitiated addition of thiols to alkynes // *Macromolecules.* – 2010. – Т. 43.
6. Hoyle C.E., Bowman C.N. Thiol–ene click chemistry // *Angew. Chem. Int. Ed.* – 2010. – Т. 49.
7. Kolb H.C., Finn M.G., Sharpless K.B. Click chemistry: diverse chemical function from a few good reactions // *Angew. Chem. Int. Ed.* – 2021. – Т. 40.
8. Lossouarn A. et al. Metalloenzyme-mediated thiol-yne addition towards photoisomerizable fluorescent dyes // *Chem. Eur. J.* – 2022. – Т. 28.
9. Nador F. et al. Thiol-yne click reaction: an interesting way to derive thiol-provided catechols // *RSC Adv.* – 2022. – Т. 11.
10. Williams C. et al. Synthesis of macrocyclic peptides via photochemical radical thiol–yne reaction // *J. Am. Chem. Soc.* – 2026. – Т. 148.

БИООРГАНИЧЕСКАЯ ХИМИЯ

Статья поступила в редакцию: 28.07.2026

Статья принята к публикации: 06.08.2026

Статья опубликована: 07.09.2026

УДК 543.544+613.292

DOI: 10.32743/UniChem.2026.147.9.23277

Определение содержания водорастворимых витаминов в семенах томатов методом высокоэффективной жидкостной хроматографии

Худжакулов Ахтам Пардабоевич

PhD

независимый научный сотрудник кафедры химии, Андижанский государственный университет

Республика Узбекистан, г. Ташкент

E-mail: xujakulovaxtam@gmail.com

Аскарров Ибрагим Рахмонович

проф.

. Андижанский государственный университет

Республика Узбекистан, г. Андижан

E-mail: i.asqarov@gmail.com

Исламов Акмал Хушвакович

ведущий научный сотрудник

Институт биоорганической химии АН РУз им. О.С. Содикова

Республика Узбекистан, г. Ташкент

E-mail: islomovakmal1972@gmail.com

Determination of water-soluble vitamin content in tomato seeds by high-performance liquid chromatography

Khudzhakulov Akhtam Pardaboevich

PhD, Candidate of Chemical Sciences

Independent Research Fellow, Department of Chemistry, Andijan State University

Republic of Uzbekistan, Tashkent

Askarov Ibragim Rakhmonovich

candidate of Chemical Sciences, Professor

Andijan State University

Republic of Uzbekistan, Andijan

Islamov Akmal Khushvakovich

candidate of Chemical Sciences

Leading Research Fellow, Institute of Bioorganic Chemistry of the Academy of Sciences of the

Republic of Uzbekistan named after O.S. Sodikov

Republic of Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

В настоящем исследовании проведено комплексное качественное и количественное определение водорастворимых витаминов в семенах томатов методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ). Актуальность исследования обусловлена возрастающим интересом к использованию растительного сырья в качестве источника природных биологически активных соединений, обладающих высокой пищевой и фармакологической ценностью. Семена томатов, являющиеся побочным продуктом переработки плодов, содержат широкий спектр физиологически активных веществ, однако их витаминный состав до настоящего времени изучен недостаточно. В связи с этим исследование содержания водорастворимых витаминов представляет значительный научный и практический интерес. Объектом исследования служили семена томатов, собранные в период полной биологической зрелости. Подготовка проб и хроматографический анализ проводились с использованием системы Agilent Technologies 1200 Series HPLC, оснащенной ультрафиолетовым детектором, что обеспечило высокую точность, чувствительность и воспроизводимость аналитических измерений. Разделение компонентов осуществлялось в оптимизированных условиях, позволяющих надежно идентифицировать и количественно определить основные водорастворимые витамины. В результате хроматографического анализа были зарегистрированы пики, соответствующие витаминам группы В и витамину С, а также определено их количественное содержание. Полученные данные свидетельствуют о наличии в семенах томатов комплекса биологически активных витаминов, обладающих высокой физиологической и антиоксидантной ценностью. Установлено, что исследуемое растительное сырье может рассматриваться как перспективный природный источник витаминов, участвующих в регуляции энергетического обмена, функционировании ферментативных систем, процессах клеточного дыхания, поддержании иммунного статуса организма и защите клеток от окислительного стресса.

Полученные результаты расширяют современные представления о химическом составе семян томатов и подтверждают целесообразность их комплексной переработки. Результаты исследования могут быть использованы при стандартизации растительного сырья, разработке функциональных пищевых продуктов, биологически активных добавок, фитофармацевтических препаратов, а также при создании новых технологий рационального использования вторичных растительных ресурсов. Проведенное исследование имеет важное научное и практическое значение для пищевой промышленности, фармацевтики, биотехнологии и фитохимии, открывая перспективы дальнейших исследований биологически активных компонентов семян томатов и оценки их фармакологических свойств.

Библиографическое описание: Худжакулов А.П., Аскарлов И.Р., Исламов А.Х. Определение содержания водорастворимых витаминов в семенах томатов методом высокоэффективной жидкостной хроматографии // Universum: химия и биология : электрон. научн. журн. 2026. 9(147). URL: <https://7universum.com/ru/nature/archive/item/23277>

Abstract

This study presents a comprehensive qualitative and quantitative determination of water-soluble vitamins in tomato seeds using high-performance liquid chromatography (HPLC). The relevance of the study is associated with the growing interest in the utilization of plant-derived materials as natural sources of biologically active compounds with high nutritional and pharmacological value. Tomato seeds, which are generated as a by-product of tomato processing, contain a wide range of physiologically active substances; however, their vitamin composition has not yet been thoroughly investigated. Therefore, the determination of water-soluble vitamins in tomato seeds is of considerable scientific and practical importance.

The study was conducted using tomato seeds collected at the stage of full biological maturity. Sample preparation and chromatographic analysis were performed on an Agilent Technologies 1200 Series HPLC system equipped with an ultraviolet (UV) detector, ensuring high analytical accuracy, sensitivity, and reproducibility. Chromatographic separation was carried out under optimized conditions, enabling the reliable identification and quantitative determination of the major water-soluble vitamins. The chromatographic analysis revealed characteristic peaks corresponding to B-group vitamins and vitamin C, and their concentrations were quantitatively determined. The obtained results demonstrate that tomato seeds contain a complex of biologically active vitamins with high physiological and antioxidant value. The investigated plant material can therefore be considered a promising natural source of vitamins involved in energy metabolism, enzymatic activity, cellular respiration, maintenance of immune function, and protection against oxidative stress.

The findings expand current knowledge of the chemical composition of tomato seeds and confirm the feasibility of their comprehensive utilization as a valuable plant resource. The results may serve as a scientific basis for the standardization of plant raw materials, the development of functional foods, dietary supplements, and phytopharmaceutical products, as well as for the design of innovative technologies aimed at the efficient utilization of plant-processing by-products. Overall, this study has significant scientific and practical implications for the food, pharmaceutical, biotechnological, and phytochemical industries and provides a foundation for further investigations into the bioactive constituents of tomato seeds and the evaluation of their biological and pharmacological properties.

Ключевые слова: *Solanum lycopersicum* L, семена томатов, водорастворимые витамины, ВЭЖХ, Agilent Technologies 1200 Series, витамин С, витамины группы В, хроматографический анализ.

Keywords: *Solanum lycopersicum* L, tomato seeds, water-soluble vitamins, HPLC, Agilent Technologies 1200 Series, vitamin C, B-group vitamins, chromatographic analysis.

1. Введение

Томат (*Solanum lycopersicum* L.) является одной из наиболее распространённых овощных культур в мире и представляет значительный интерес как источник биологически активных соединений. Помимо плодов, ценным сырьём являются и семена томатов, содержащие белки, жирные кислоты, фенольные соединения, каротиноиды, токоферолы и витамины (Peralta & Spooner, 2007; FAO, 2023).

Особое внимание в последние годы уделяется исследованию водорастворимых витаминов, поскольку они являются незаменимыми участниками большинства биохимических процессов организма человека. К этой группе относятся аскорбиновая кислота (витамин С) и витамины комплекса В (тиамин, рибофлавин, никотиновая кислота, пиридоксин, фолиевая кислота и другие). Они участвуют в энергетическом обмене, синтезе нуклеиновых кислот, функционировании нервной системы и антиоксидантной защите клеток (Ball, 2006; Combs, 2012). Определение содержания водорастворимых витаминов в растительном сырье требует применения высокочувствительных аналитических методов. Одним из наиболее точных методов является высокоэффективная жидкостная хроматография (ВЭЖХ), обеспечивающая высокую селективность, воспроизводимость и возможность одновременного определения нескольких витаминов в сложных растительных матрицах (Snyder et al., 2010; Agilent Technologies, 2010). Несмотря на многочисленные исследования химического состава плодов томатов, сведения о содержании водорастворимых витаминов именно в семенах остаются ограниченными. Изучение витаминного состава семян представляет интерес как с научной, так и с практической точки зрения, поскольку позволяет оценить возможность их использования в качестве источника биологически активных веществ для пищевой, фармацевтической и косметической промышленности. Целью настоящего исследования являлось качественное и количественное определение содержания водорастворимых витаминов в семенах томатов методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) с использованием системы Agilent Technologies 1200 Series.

2. Материалы и методы

2.1. Объект исследования



Рисунок 1. Плоды томата (*Solanum lycopersicum* L.) и семена, использованные в исследовании

Объектом исследования служили семена томатов (*Solanum lycopersicum* L.), собранные в период полной биологической зрелости в июле 2025 года на территории Республики Узбекистан. После сбора семена были отделены от мякоти плодов, тщательно промыты дистиллированной водой и высушены при температуре 25–30 °С в хорошо проветриваемом помещении до достижения постоянной массы. Высушенные образцы измельчали в лабораторной мельнице до порошкообразного состояния и просеивали через сито с размером отверстий 1 мм. Полученный порошок хранили в герметично закрытых полиэтиленовых контейнерах в сухом и защищённом от света месте до проведения анализа. Внешний вид плодов томата и выделенных семян, использованных в исследовании, представлен на рисунке 1.

2.2. Реактивы и материалы

Для определения водорастворимых витаминов использовали реактивы аналитической чистоты: метанол (HPLC grade), ацетонитрил (HPLC grade), ортофосфорную кислоту, дигидрофосфат калия, дистиллированную воду, а также стандартные образцы витаминов В₁ (тиамин), В₂ (рибофлавин), РР (В₃, никотиновая кислота), В₆ (пиридоксин), В₉ (фолиевая кислота) и витамина С (аскорбиновая кислота) производства Sigma-Aldrich (США). Все растворы готовили с использованием ультрачистой воды, полученной системой Milli-Q.

2.3. Подготовка проб

Для анализа навеску измельчённых семян массой 1,0 г помещали в коническую колбу и экстрагировали 20 мл 0,1 %-ного раствора ортофосфорной кислоты в ультразвуковой бане при комнатной температуре в течение 30 минут. Полученный экстракт центрифугировали при 6000 об/мин в течение 10 минут, после чего надосадочную жидкость фильтровали через мембранный фильтр с диаметром пор 0,22 мкм и переносили во флаконы для ВЭЖХ-анализа.

2.4. Хроматографический анализ

Качественное и количественное определение водорастворимых витаминов проводили методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) на системе Agilent Technologies 1200 Series, оснащённой четырёхканальным насосом, автоматическим пробоотборником, термостатом колонки и ультрафиолетовым детектором (UV). Хроматографическое разделение осуществляли на колонке Zorbax Eclipse XDB-C18 (4,6 × 150 мм, размер частиц 5 мкм).

В качестве подвижной фазы использовали:

1. Элюент А — 0,05 М раствор дигидрофосфата калия (KH_2PO_4);
2. Элюент В — метанол.

Разделение проводили в режиме градиентного элюирования.

Условия хроматографирования:

1. скорость потока — 1,0 мл/мин;
2. температура колонки — 30 °С;
3. объём вводимой пробы — 20 мкл;
4. длина волны детектирования — 250 нм;

5. общее время анализа — 25 минут.

Идентификацию витаминов проводили по времени удерживания (Retention Time) с использованием стандартных растворов. Количественное определение выполняли методом внешнего стандарта по калибровочным графикам. Содержание витаминов выражали в мг/г сухой массы семян томатов.

2.5. Статистическая обработка данных

Все определения выполняли в трёхкратной повторности. Результаты представлены в виде среднего значения $\pm$ стандартного отклонения (Mean $\pm$ SD). Статистическую обработку экспериментальных данных проводили с использованием программ Microsoft Excel 2021 и OriginPro 2024. Различия между средними значениями считались статистически значимыми при $p < 0,05$.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Определение содержания водорастворимых витаминов в семенах томатов

Количественное определение водорастворимых витаминов в семенах томатов проводили методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) с использованием системы Agilent Technologies 1200 Series. Хроматографический анализ позволил идентифицировать шесть водорастворимых витаминов: тиамин (B_1), рибофлавин (B_2), никотиновую кислоту (PP, B_3), пиридоксин (B_6), фолиевую кислоту (B_9) и аскорбиновую кислоту (витамин C). Результаты количественного анализа представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Результаты количественного анализа

№	Витамин	Содержание, мг/г
1	Витамин B_1 (Тиамин)	$0,039003 \pm 0,001388$
2	Витамин B_2 (Рибофлавин)	$1,330885 \pm 0,202390$
3	Витамин PP (B_3 , никотиновая кислота)	$0,064127 \pm 0,010534$
4	Витамин B_6 (Пиридоксин)	$4,344716 \pm 0,269243$
5	Витамин B_9 (Фолиевая кислота)	$9,616691 \pm 0,141601$
6	Витамин C (Аскорбиновая кислота)	$0,539833 \pm 0,055682$

Хроматографический анализ водорастворимых витаминов в семенах томатов был выполнен методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) с использованием системы Agilent Technologies 1200 Series. Полученная хроматограмма представлена на рисунке 2

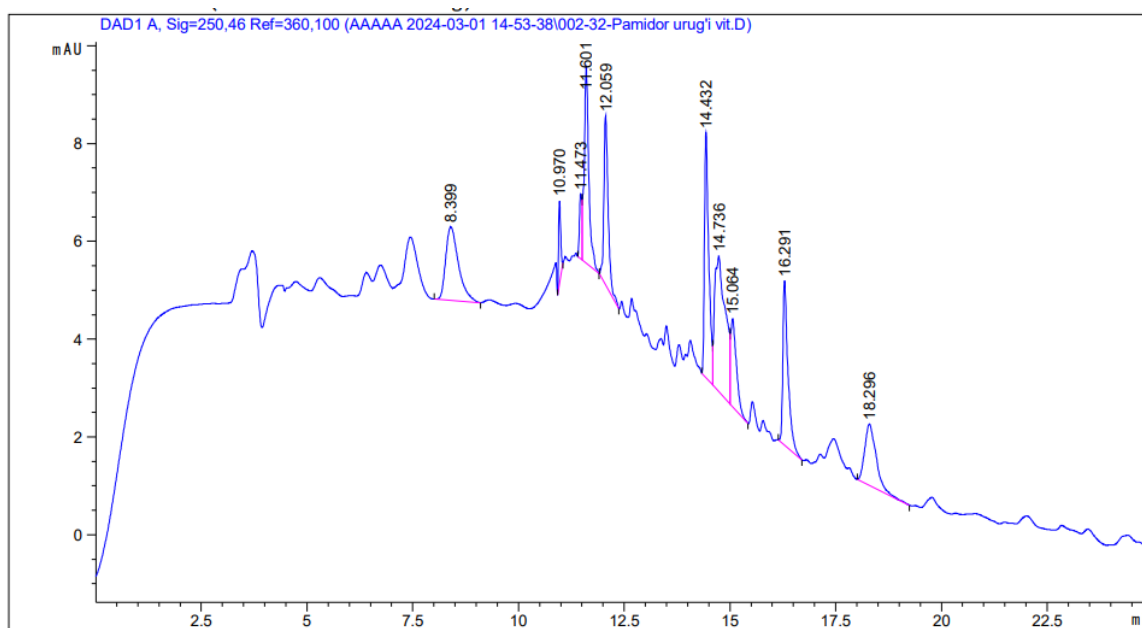


Рисунок 2. Хроматограмма водорастворимых витаминов, определённых в семенах томатов методом ВЭЖХ (Agilent Technologies 1200 Series)

Полученные результаты показали, что среди исследованных соединений наибольшее содержание приходится на фолиевую кислоту (витамин B_9), концентрация которой составила 9,644809 мг/г. Известно, что фолиевая кислота принимает участие в синтезе нуклеиновых кислот, процессах клеточного деления и кроветворения, а также играет важную роль в профилактике врождённых пороков развития и сердечно-сосудистых заболеваний (Combs, 2012; Ball, 2006).

Вторым по содержанию витамином оказался пиридоксин (витамин B_6) — 4,263523 мг/г. Витамин B_6 является коферментом многочисленных ферментов, регулирующих обмен аминокислот, белков и углеводов. Кроме того, он участвует в синтезе нейромедиаторов и способствует нормальному функционированию иммунной системы (Kennedy, 2016). Содержание рибофлавина (витамина B_2) составило 1,541992 мг/г. Рибофлавин входит в состав коферментов ФАД и ФМН, обеспечивающих процессы тканевого дыхания и энергетического обмена. Его наличие повышает биологическую ценность исследуемого растительного сырья (Powers, 2003). Концентрация аскорбиновой кислоты (витамина С) достигла 0,579656 мг/г. Аскорбиновая кислота является одним из важнейших природных антиоксидантов, защищающих клетки от окислительного стресса, стимулирующих синтез коллагена и повышающих устойчивость организма к неблагоприятным факторам окружающей среды (Padayatty et al., 2003).

Содержание никотиновой кислоты (витамин РР, B_3) составило 0,074236 мг/г, а тиамин (витамина B_1) — 0,038943 мг/г. Несмотря на относительно невысокие концентрации, данные витамины являются незаменимыми компонентами обмена веществ и входят в состав коферментов, участвующих в процессах клеточного дыхания и энергетического метаболизма (Combs, 2012). Полученные результаты согласуются с данными международных исследований, согласно которым семена томатов содержат широкий спектр водорастворимых витаминов, однако их количественный состав существенно зависит от сорта растения,

почвенно-климатических условий, степени зрелости плодов и условий хранения (George et al., 2004; USDA, 2024). Высокое содержание витаминов группы В, особенно В₆ и В₉, свидетельствует о высокой пищевой и биологической ценности семян томатов.

Таким образом, проведённый ВЭЖХ-анализ подтвердил, что семена томатов являются перспективным источником водорастворимых витаминов. Полученные результаты могут быть использованы при разработке функциональных пищевых продуктов, биологически активных добавок и фитофармацевтических препаратов, а также при стандартизации растительного сырья.

4. Заключение

В настоящем исследовании методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) с использованием системы Agilent Technologies 1200 Series впервые проведено комплексное определение содержания водорастворимых витаминов в семенах томатов.

В результате анализа были идентифицированы шесть водорастворимых витаминов: тиамин (В₁), рибофлавин (В₂), никотиновая кислота (РР, В₃), пиридоксин (В₆), фолиевая кислота (В₉) и аскорбиновая кислота (витамин С). Наибольшее содержание выявлено для фолиевой кислоты (9,644809 мг/г) и пиридоксина (4,263523 мг/г), тогда как содержание витаминов В₂ (1,541992 мг/г), витамина С (0,579656 мг/г), РР (0,074236 мг/г) и В₁ (0,038943 мг/г) было ниже, однако также свидетельствует о высокой биологической ценности исследуемого сырья. Полученные результаты подтверждают, что семена томатов являются перспективным природным источником водорастворимых витаминов и могут рассматриваться как ценное растительное сырьё для производства функциональных пищевых продуктов, биологически активных добавок и фитофармацевтических препаратов.

Практическая значимость исследования заключается в возможности использования полученных данных при стандартизации лекарственного растительного сырья, разработке новых технологий переработки семян томатов и создании продуктов с повышенной пищевой и биологической ценностью. В дальнейшем целесообразно провести сравнительное исследование различных сортов томатов, выращенных в разных почвенно-климатических условиях, а также изучить влияние условий хранения и переработки на содержание водорастворимых витаминов.

Основные результаты исследования

1. Впервые определено содержание водорастворимых витаминов в семенах томатов методом ВЭЖХ.
2. Анализ выполнен на системе Agilent Technologies 1200 Series HPLC.
3. Идентифицировано шесть водорастворимых витаминов (В₁, В₂, В₃, В₆, В₉ и витамин С).
4. Наибольшее содержание установлено для фолиевой кислоты (В₉) и пиридоксина (В₆).
5. Семена томатов являются перспективным источником биологически активных витаминов для пищевой и фармацевтической промышленности.

Список литературы

1. Гил-Геррерро, Х.Л., Реболлосо-Фуэнтес, М.М., Торихиа-Исаса, М.Е. Fatty acids and carotenoids from tomato seed oils / Х.Л. Гил-Геррерро, М.М. Реболлосо-Фуэнтес, М.Е. Торихиа-Исаса // Journal of the American Oil Chemists' Society. – 1999. – Т. 76. – С. 1251–1254.
2. Родригес-Амайя, Д.Б. Food Carotenoids: Chemistry, Biology and Technology / Д.Б. Родригес-Амайя. – Hoboken: Wiley, 2019. – 327 P.
3. Agilent Technologies. Agilent 1200 Series LC System User Guide. Agilent Technologies. Agilent Technologies. – 2010. – 152 P.
4. AOAC International. Official Methods of Analysis (22nd ed.). AOAC International. – AOAC International. – 2023.
5. Ball, G.F.M. Vitamins in Foods: Analysis, Bioavailability, and Stability. CRC Press. – 2006. – 824 P.
6. Bender, D.A. Nutritional Biochemistry of the Vitamins (2nd ed.). Cambridge University Press. – 2003. – 488 P.
7. Combs, G.F. The Vitamins: Fundamental Aspects in Nutrition and Health (4th ed.). Academic Press. – 2012. – 784 P.
8. Davey, M.W., Van Montagu, M.V. et al. Plant L-ascorbic acid: chemistry, function and biosynthesis / M.W. Davey, M.V. Van Montagu [et al.] // Journal of the Science of Food and Agriculture. – 2000. – Т. 80. – P. 825–860.
9. FAO. FAOSTAT Crops and Livestock Products Database / FAO. – Rome: FAO, 2023. – [Электронный ресурс].
10. George, B., Kaur, C., Khurdiya, D.S., Kapoor, H.C. Antioxidants in tomato (*Lycopersicon esculentum*) as a function of genotype / B. George, C. Kaur, D.S. Khurdiya, H.C. Kapoor // Food Chemistry. – 2004. – Т. 84, № 1. – P. 45–51.
11. Kennedy, D.O. B Vitamins and the Brain / D.O. Kennedy // Nutrients. – 2016. – Т. 8, № 2.
12. Padayatty, S.J., Katz, A., Wang, Y. et al. Vitamin C as an antioxidant / S.J. Padayatty, A. Katz, Y. Wang [et al.] // Journal of the American College of Nutrition. – 2003. – Т. 22, № 1. – P. 18–35.
13. Snyder, L.R., Kirkland, J.J. & Dolan, J.W. Introduction to Modern Liquid Chromatography (3rd ed.). Wiley. – 2010.
14. Snyder, L.R., Kirkland, J.J. & Dolan, J.W. Introduction to Modern Liquid Chromatography (3rd ed.). Wiley. – 2010.
15. World Health Organization. Vitamin and Mineral Requirements in Human Nutrition / World Health Organization. – 2-е изд. – Geneva: World Health Organization, 2021. – 314 P.

References

1. Gil-Guerrero J.L., Rebollosa-Fuentes M.M., Torijia-Isaza M.E. [Fatty acids and carotenoids from tomato seed oils] // Journal of the American Oil Chemists' Society, 76, 1251–1254. – 1999. (In Russ.)

2. [Food Carotenoids: Chemistry, Biology and Technology] (In Russ.)
3. Agilent Technologies. Agilent 1200 Series LC System User Guide. Agilent Technologies. Agilent Technologies. – 2010.
4. AOAC International. Official Methods of Analysis (22nd ed.). AOAC International. T. 22nd ed. – AOAC International, 2023.
5. Ball G.F.M. Vitamins in Foods: Analysis, Bioavailability, and Stability. CRC Press. – 2006.
6. Bender D.A. Nutritional Biochemistry of the Vitamins (2nd ed.). Cambridge University Press. – 2003.
7. Combs G.F. The Vitamins: Fundamental Aspects in Nutrition and Health (4th ed.). Academic Press. – 2012.
8. Davey M.W., Montagu M.V. et al. Plant L-ascorbic acid: chemistry, function and biosynthesis // Journal of the Science of Food and Agriculture, 80, 825–860. – 2000.
9. FAO. FAOSTAT Crops and Livestock Products Database. FAO. – FAO. – 2023.
10. George, B., Kaur, C., Khurdiya D.S. & Kapoor H.C. Antioxidants in tomato (*Lycopersicon esculentum*) as a function of genotype. Food Chemistry, 84(1), 45–51. – 2004.
11. Kennedy D.O. B Vitamins and the Brain. Nutrients, 8(2), 68. – 2016.
12. Padayatty S.J., Katz, A., Wang, Y. et al. Vitamin C as an antioxidant // Journal of the American College of Nutrition, 22(1), 18–35. – 2003.
13. Snyder L.R., Kirkl J.J. & Dolan J.W. Introduction to Modern Liquid Chromatography (3rd ed.). Wiley. – 2010.
14. USDA FoodData Central. Tomatoes and tomato seeds composition database. – USDA. – 2024.
15. World Health Organization. Vitamin and Mineral Requirements in Human Nutrition (2nd ed.). World Health Organization. – World Health Organization. – 2021.

Статья поступила в редакцию: 14.08.2026

Статья принята к публикации: 27.08.2026

Статья опубликована: 07.09.2026

УДК + 543.42+582.675.1

DOI: 10.32743/UniChem.2026.147.9.23344

Состав и содержание микро- и макроэлементов в надземной и подземной частях растения *Aconitum talassicum*

Эшматов Жасурбек Муродович

независимый исследователь Ферганский государственный университет

Республика Узбекистан, г. Фергана

ORCID: 0009-0007-5090-5894

Жалолов Икболжон Жамолович

проф. кафедры химии

Ферганский государственный университет

Республика Узбекистан, г. Фергана

ORCID: 0009-0003-3530-5699

Турсунов Жахонгир Исроилович

д-р филос. (PhD) по хим. наукам, доц.

кафедра химии, Ферганский государственный университет

Республика Узбекистан, г. Фергана

ORCID: 0000-0002-6910-6300

E-mail: bioximik1177@mail.ru

Шергазиев Киличбек Маруфжон угли

ст. преп. кафедры химии

Ферганский государственный университет

Республика Узбекистан, г. Фергана

ORCID: 0000-0001-5917-7255

Composition and content of micro- and macroelements in the aboveground and underground parts of *Aconitum talassicum*

Eshmatov Jasurbek Murodovich

Independent Researcher

Fergana State University

Republic of Uzbekistan, Fergana

Jalolov Iqboljon Jamolovich

professor

Department of Chemistry, Fergana State University

Republic of Uzbekistan, Fergana

Tursunov Jakhongir Isroilovich

doctor of Philosophy (PhD)

in Chemical Sciences, Associate Professor, Department of Chemistry, Fergana State University

Republic of Uzbekistan, Fergana

Shergʻoziyev Qilichbek Marufjon oʻgʻli

senior Lecturer

Department of Chemistry, Fergana State University

Republic of Uzbekistan, Fergana

Аннотация

В настоящей работе методом оптической эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (ICP-OES) получены сравнительные данные об элементном составе надземной и подземной частей *Aconitum talassicum* Попов, собранного в условиях Узбекистана. Цель исследования — определить содержание макро-, микро- и потенциально токсичных элементов и выявить особенности их распределения между органами растения. Надземную часть и корни одного растения анализировали отдельно после микроволновой минерализации смесью концентрированной азотной кислоты и пероксида водорода в системе Berghof Speedwave Xpert. Измерения выполняли на спектрометре PerkinElmer Avio 200; каждый минерализат измеряли трижды. Установлено, что содержание К в надземной части и корнях составило соответственно 27 130 и 7 712 мг/кг, Fe — 321,4 и 1 434 мг/кг, Zn — 224,2 и 31,22 мг/кг, Pb — 0,2508 и 4,223 мг/кг. Калий и цинк преимущественно накапливались в надземной части, тогда как железо, марганец, стронций и свинец — в корнях. Новизна работы заключается в получении сравнительных данных о распределении элементов между органами исследованного экземпляра *A. talassicum* из Узбекистана. Поскольку исследован один биологический образец, результаты следует рассматривать как первичную характеристику, требующую подтверждения на расширенной выборке.

Abstract

In this study, inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES) was used to obtain comparative data on the elemental composition of the aboveground and underground parts of *Aconitum talassicum* Popov collected in Uzbekistan. The aim was to determine macro-, micro-, and potentially toxic elements and evaluate their distribution between plant organs. The aboveground part and roots of one plant were analyzed separately after microwave digestion with concentrated nitric acid and hydrogen peroxide using a Berghof Speedwave Xpert system. Measurements were performed on a PerkinElmer Avio 200 spectrometer; each mineralizate was measured three times. The K content in the aboveground part and roots was 27,130 and 7,712 mg/kg, respectively; Fe, 321.4 and 1,434 mg/kg; Zn, 224.2 and 31.22 mg/kg; and Pb, 0.2508 and 4.223 mg/kg. Potassium and zinc predominated in the aboveground part, whereas iron, manganese, strontium, and lead predominated in the roots. The novelty lies in comparative data on elemental distribution between the organs of the examined *A. talassicum* specimen from Uzbekistan. Since only one biological sample was studied, the findings should be regarded as preliminary and require confirmation in a larger sample.

Ключевые слова: *Aconitum talassicum*, надземная часть, корень, макроэлементы, микроэлементы, минеральный состав, ICP-OES, микроволновая минерализация.

Keywords: *Aconitum talassicum*, aerial part, root, macroelements, microelements, mineral composition, ICP-OES, microwave digestion.

Библиографическое описание: Состав и содержание микро- и макроэлементов в надземной и подземной частях растения *Aconitum talassicum* // Universum: химия и биология : электрон. научн. журн. Эшматов Ж.М. [и др.]. 2026. 9(147). URL: <https://7universum.com/ru/nature/archive/item/23344>

Введение

Биологические свойства и качество лекарственного растительного сырья зависят не только от органических метаболитов, но и от состава минеральных элементов. Эссенциальные элементы участвуют в ферментативных, фотосинтетических и окислительно-восстановительных процессах, тогда как накопление потенциально токсичных элементов требует отдельного контроля при оценке безопасности сырья [4, 3].

Род *Aconitum* L. семейства *Ranunculaceae* объединяет фармакологически значимые, но токсичные растения, основными характерными компонентами которых являются дитерпеноидные алкалоиды. Современные обзоры подчёркивают анальгетический и противовоспалительный потенциал представителей рода, одновременно указывая на их узкий терапевтический диапазон, кардио- и нейротоксичность [13,2,9].

Исследования *Aconitum* в последние годы сосредоточены преимущественно на фитохимии, токсикологии и омиксных подходах. При этом межорганные различия метаболитов и элементного профиля рассматриваются как важная составляющая стандартизации и установления происхождения растительного сырья [7].

Анализ неорганических элементов в *Aconiti Kusnezoffii Radix* и продуктах его переработки показал информативность элементного профилирования для оценки происхождения и потенциального риска [15]. Применение ICP-OES при анализе лекарственных растений обосновано высокой многоэлементностью, чувствительностью и широким аналитическим диапазоном метода [11].

Исследования других лекарственных видов подтверждают, что корни, стебли, листья и генеративные органы способны существенно различаться по накоплению Fe, Mn, Zn, Cu, Sr, Ba и потенциально токсичных элементов. Следовательно, объединение разных органов в одну пробу может скрывать органоспецифические закономерности [12, 5].

Aconitum talassicum Porov является представителем флоры Центральной Азии; его ареал связан с горными экосистемами региона. В отличие от ряда фармакопейных видов рода *Aconitum*, для *A. talassicum* сведения об элементном составе отдельных органов практически отсутствуют. Исследование экземпляра из Узбекистана представляет интерес как исходная характеристика регионального растительного сырья и как основа для последующего сравнения популяций, сезонов и условий произрастания [1, 6].

Целью настоящего исследования являлось установление элементного профиля наземной и подземной частей *A. talassicum* методом ICP-OES, количественная оценка содержания макро-, микро- и потенциально токсичных элементов, а также выявление особенностей их органоспецифического распределения.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования служили наземная часть и корни *Aconitum talassicum* Porov. Таксономическое наименование вида сверяли с ботаническими источниками и международными номенклатурными базами [3, 4, 13]. На рисунке 1 представлены общий вид растения и исследованные морфологические части.



Рисунок 1. Морфологические особенности *Aconitum talassicum* Попов: а — растение в естественных условиях произрастания; б — надземная часть (соцветие); в — подземная часть (корневища и корни)

Один экземпляр растения был собран в фазе цветения в июле 2025 года в окрестностях села Эрташсай, перевал Камчик, Ташкентская область, Узбекистан. Надземную часть и корни данного экземпляра отделяли и исследовали как две самостоятельные пробы.

Таким образом, исследование включало один биологический образец (одно растение), разделённый на надземную и подземную части. Полученные данные характеризуют исследованный экземпляр и не предназначены для оценки внутривидовой, сезонной или географической вариабельности.

После сбора надземную часть очищали от посторонних примесей, а корни тщательно освобождали от частиц почвы, промывали проточной, затем бидистиллированной водой и высушивали фильтровальной бумагой. Надземную и подземную части высушивали в лабораторных условиях отдельно, измельчали до однородного размера частиц и хранили в чистых сухих закрытых ёмкостях.

Из каждого измельчённого и гомогенизированного образца на аналитических весах отбирали навеску массой 0,1000 г и количественно переносили в тefлоновый автоклав. К навеске добавляли 3 мл концентрированной азотной кислоты квалификации «особо чистая» и 2 мл 30 %-ного пероксида водорода квалификации «чистая для анализа».

Автоклав герметично закрывали и помещали в микроволновую систему пробоподготовки Berghof Speedwave Xpert. Разложение проводили с постепенным повышением температуры до 230 °С при максимальном давлении 40 бар в течение 35–45 мин; температуру и давление контролировали автоматически.

После охлаждения минерализат количественно переносили в мерную колбу вместимостью 100 мл. Стенки автоклава 2–3 раза промывали бидистиллированной водой, промывные воды объединяли с минерализатом, раствор доводили до метки бидистиллированной водой и тщательно перемешивали.

Определение элементов методом ICP-OES

Содержание элементов определяли методом оптической эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой на спектрометре PerkinElmer Avio 200. Раствор через автоматическую систему подачи поступал в распылительную камеру, после чего в аргонной плазме происходили атомизация, ионизация и возбуждение аналитов. Используемые стандартные рабочие условия приведены в таблице 1.

Перед измерениями прибор калибровали с использованием сертифицированных многоэлементных стандартных растворов. Концентрацию рассчитывали по соответствующей градуировочной зависимости с учётом массы навески, конечного объёма 100 мл и общего коэффициента разбавления 1000. Аналитические линии (нм): K 766,490; Ca 317,933; Mg 285,213; Na 589,592; P 213,617; Fe 238,204; Al 396,153; Mn 257,610; Zn 213,857; Cu 327,393; B 249,677; Ba 233,527; Sr 407,771; Co 228,616; Ni 231,604; Cr 267,716; Pb 220,353; Cd 228,802; As 188,979; Hg 253,652; Se 196,026.

Каждый минерализат измеряли три раза в рамках одной инструментальной серии ($n = 3$, инструментальные повторы). В таблицах приведены среднее значение, SD и RSD трёх инструментальных измерений одного раствора; эти показатели характеризуют инструментальную повторяемость, а не вариабельность независимых минерализаций или биологических образцов.

Для элементов, не давших достоверного аналитического сигнала в рабочем диапазоне применённой процедуры, использовано обозначение «не обнаружено». Численные значения LOD, LOQ и коэффициентов градуировочных зависимостей в исходном протоколе отсутствовали; поэтому работа не претендует на полную самостоятельную валидацию метода.

Методический подход соответствует современному применению ICP-OES для многоэлементного анализа лекарственного растительного сырья. Ограничения аналитической валидации и единичный характер биологического образца учтены при интерпретации результатов.

Таблица 1.

Стандартные рабочие условия ICP-OES-анализа

Параметр	Значение
Прибор	PerkinElmer Avio 200 ICP-OES
Мощность ВЧ-генератора	1500 Вт
Расход плазмообразующего аргона	8,0 л/мин
Расход вспомогательного аргона	0,2 л/мин
Расход газа распылителя	0,7 л/мин
Скорость подачи образца	1,5 мл/мин
Режим наблюдения плазмы	аксиальный/радиальный, в зависимости от элемента
Число повторных измерений	3

Результаты и их обсуждение

ICP-OES-анализ позволил получить первичные количественные данные о содержании макро-, микро- и потенциально токсичных элементов в надземной части и корнях исследованного экземпляра *A. talassicum*.

Таблица 2.

Содержание макро- и микроэлементов в надземной части растения *Aconitum talassicum*

№	Элемент	Химический символ	Содержание, мг/кг	SD	RSD, %
1	Калий	K	27130	62,399	0,23
2	Кальций	Ca	Не обнаружено	—	—
3	Магний	Mg	Не обнаружено	—	—
4	Натрий	Na	Не обнаружено	—	—
5	Фосфор	P	Не обнаружено	—	—
6	Железо	Fe	321,4	1,478	0,46
7	Алюминий	Al	165,7	2,353	1,42
8	Марганец	Mn	68,76	0,206	0,30
9	Цинк	Zn	224,2	2,735	1,22
10	Медь	Cu	10,66	0,174	1,63
11	Бор	B	Не обнаружено	—	—
12	Барий	Ba	15,21	0,075	0,49
13	Стронций	Sr	0,0023	0,000009	0,39
14	Кобальт	Co	0,0918	0,00072	0,78
15	Никель	Ni	7,654	0,031	0,41
16	Хром	Cr	11,71	0,121	1,03
17	Свинец	Pb	0,2508	0,0022	0,86
18	Кадмий	Cd	Не обнаружено	—	—
19	Мышьяк	As	Не обнаружено	—	—
20	Ртуть	Hg	0,0203	0,000024	0,12

Aconitum talassicum

Примечание: данные представлены как среднее $\pm$ SD для трёх повторных инструментальных измерений одного минерализата ($n = 3$, инструментальные повторы); RSD — относительное стандартное отклонение. «Не обнаружено» — аналитический сигнал отсутствовал в рабочем диапазоне применённой процедуры.

Таблица 3.

Содержание макро- и микроэлементов в корнях растения *Aconitum talassicum*

№	Элемент	Химический символ	Содержание, мг/кг	SD	RSD, %
1	Калий	K	7712	43,187	0,56
2	Кальций	Ca	Не обнаружено	—	—
3	Магний	Mg	Не обнаружено	—	—
4	Натрий	Na	Не обнаружено	—	—

№	Элемент	Химический символ	Содержание, мг/кг	SD	RSD, %
5	Фосфор	P	Не обнаружено	—	—
6	Железо	Fe	1434	18,929	1,32
7	Алюминий	Al	106,8	0,929	0,87
8	Марганец	Mn	162,3	0,909	0,56
9	Цинк	Zn	31,22	0,0062	0,02
10	Медь	Cu	13,45	0,226	1,68
11	Бор	B	Не обнаружено	—	—
12	Барий	Ba	24,16	0,268	1,11
13	Стронций	Sr	43,31	0,420	0,97
14	Кобальт	Co	Не обнаружено	—	—
15	Никель	Ni	0,008	0,000033	0,41
16	Хром	Cr	11,54	0,144	1,25
17	Свинец	Pb	4,223	0,084	1,99
18	Кадмий	Cd	Не обнаружено	—	—
19	Мышьяк	As	Не обнаружено	—	—
20	Ртуть	Hg	0,0192	0,000117	0,61
21	Селен	Se	2,393	0,0089	0,37

Примечание: данные представлены как среднее $\pm$ SD для трёх повторных инструментальных измерений одного минерализата ($n = 3$, инструментальные повторы); RSD — относительное стандартное отклонение. «Не обнаружено» — аналитический сигнал отсутствовал в рабочем диапазоне применённой процедуры.

При исследовании элементного состава корней растения *Aconitum talassicum* методом ICP-OES среди определённых элементов наибольшее содержание было установлено для калия — 7712 мг/кг. Содержание железа составило 1434 мг/кг, марганца — 162,3 мг/кг, алюминия — 106,8 мг/кг. Кроме того, содержание стронция составило 43,31 мг/кг, цинка — 31,22 мг/кг, бария — 24,16 мг/кг, меди — 13,45 мг/кг, а хрома — 11,54 мг/кг.

Преимущественное накопление Fe, Mn, Sr и Pb в корнях согласуется с непосредственным контактом корневой системы с почвенным субстратом. В современных исследованиях лекарственных растений также показаны выраженные межорганные различия элементного профиля, однако направление и величина различий зависят от вида, органа, почвы, географического происхождения и подготовки проб [12, 5, 10, 14]. Поэтому прямое количественное сопоставление *A. talassicum* с другими таксонами возможно только как ориентировочное.

Повышенное накопление Fe, Mn, Sr и ряда других элементов в корнях согласуется с непосредственным контактом корневой системы с почвой и с данными о различиях элементного профиля между органами лекарственных растений. Однако прямое количественное сопоставление между видами следует проводить осторожно, поскольку на концентрации влияют почва, географическое происхождение, фаза развития и подготовка проб.

Концентрация Pb составила 0,2508 мг/кг в надземной части и 4,223 мг/кг в корнях. Этот результат подтверждает необходимость контроля потенциально токсичных элементов в лекарственном растительном сырье. Вместе с тем обнаружение элемента в одном экземпляре растения не позволяет оценить риск для здоровья без данных о форме употребления, извлечении элемента, дозе и продолжительности воздействия.

Содержание Sr в обеих частях было близким: 11,71 мг/кг в надземной части и 11,54 мг/кг в корнях. Для Hg также не выявлено выраженного межорганный различия: 0,0203 и 0,0192 мг/кг соответственно. Cd и As не обнаружены в рабочем диапазоне применённой процедуры.

Для Ni отношение надземная часть/корень составило около 957, поскольку в корнях определено 0,008 мг/кг против 7,654 мг/кг в надземной части. Для Sr наблюдалась противоположная картина: 0,0023 мг/кг в надземной части и 43,31 мг/кг в корнях. Указанные значения сверены с исходной таблицей и сохранены, однако столь резкие контрасты могут быть чувствительны к пределу количественного определения, матричным эффектам и единичной минерализации. Их следует рассматривать как предварительные и подтвердить независимой повторной минерализацией и анализом расширенной выборки.

В совокупности результаты свидетельствуют о различиях распределения элементов между надземной частью и корнями исследованного экземпляра *A. talassicum*. Практическая значимость данных состоит в формировании исходной базы для дальнейшего фитохимического и экологического мониторинга вида; экстраполяция выявленного профиля на вид в целом пока преждевременна.

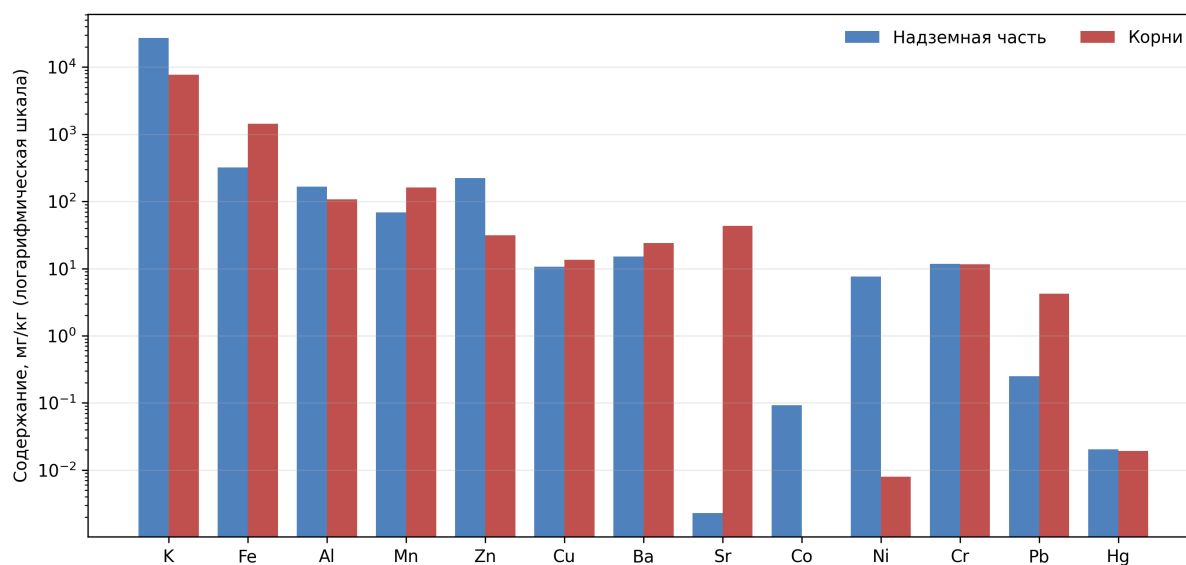


Рисунок 2. Сравнительное распределение элементов в надземной части и корнях *Aconitum talassicum* (логарифмическая шкала; «не обнаружено» не отображено)

Ограничениями исследования являются один биологический образец, отсутствие независимых повторных минерализаций и неполный набор показателей аналитической валидации. Поэтому установленные различия характеризуют изученный экземпляр и не должны без дополнительной выборки экстраполироваться на весь вид *A. talassicum*.

Заключение

В исследованном экземпляре *A. talassicum* более высокие концентрации К, Zn и Al установлены в надземной части, тогда как Fe, Mn, Sr, Cu, Ba и Pb — в корнях. Наиболее заметные различия получены для К (27 130 против 7 712 мг/кг), Fe (321,4 против 1 434 мг/кг), Zn (224,2 против 31,22 мг/кг) и Pb (0,2508 против 4,223 мг/кг). Научная новизна состоит в сравнительной характеристике элементного состава двух органов экземпляра *A. talassicum*, собранного в Узбекистане. Практическая значимость заключается в создании исходных данных для контроля качества сырья и последующего экологического мониторинга. Ограничения исследования — один биологический образец, отсутствие независимых повторных минерализаций и неполная аналитическая валидация. Перспективы работы включают расширение выборки, анализ почвы, определение LOD/LOQ, использование сертифицированного референтного материала и повторную проверку Sr и Ni.

Список литературы

1. Агапова Н.Д. Семейство лютиковые (Ranunculaceae) // Жизнь растений: в 6. — 1980. — Т. 5. — С. 210–216.
2. Chan Y.-T., Wang N., Feng Y. The toxicology and detoxification of Aconitum: traditional and modern views // Chinese Medicine. — 2021. — Т. 16. — DOI: 10.1186/s13020-021-00472-9.
3. Douvris C., Vaughan T., Bussan D.D., Bartzas G. et al. How ICP-OES changed the face of trace element analysis: Review of the global application landscape // Science of the Total Environment. — 2023. — Т. 905. — Art. 167242. — DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.167242.
4. Ebrahimzadeh G., Omer A.K., Naderi M., Sharafi K. Human health risk assessment of potentially toxic and essential elements in medicinal plants consumed in Zabol, Iran, using the Monte Carlo simulation method // Scientific Reports. — 2024. — Т. 14. — Art. 23756. — DOI: 10.1038/s41598-024-75159-w.
5. Häßler M., Wetzels K., Warnecke L. et al. Assessment of the differentiation of Sambucus nigra plant parts using a multi-target and suspect screening by LC-HRMS and ICP-OES // Analytical and Bioanalytical Chemistry. — 2025. — Т. 417. — P. 6209–6220. — DOI: 10.1007/s00216-025-06112-7.
6. International Plant Names Index (IPNI). Aconitum talassicum Popov / International Plant Names Index. — [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ipni.org/n/707867-1> (дата обращения: 15.08.2026).
7. Kakkar R.A., Haneen M.A., Parida A.C., Sharma G. The known, unknown, and the intriguing about members of a critically endangered traditional medicinal plant genus Aconitum // Frontiers in Plant Science. — 2023. — Т. 14. — Art. 1139215. — DOI: 10.3389/fpls.2023.1139215.
8. Ma L., Yang L., Tang L. et al. Sample preparation techniques for quality evaluation and safety control of medicinal and edible plants: Overview, advances, applications, and future perspectives // Journal of Pharmaceutical Analysis. — 2025. — Т. 15. — Art. 101296. — DOI: 10.1016/j.jpha.2025.101296.

9. Nyirimigabo E., Xu Y., Li Y., Wang Y., Agyemang K., Zhang Y. A review on phytochemistry, pharmacology and toxicology studies of *Aconitum* // *Journal of Pharmacy and Pharmacology*. – 2015. – Т. 67, № 1. – P. 1–19. – DOI: 10.1111/jphp.12310.
10. Oladeji O.M., Kopaopa B.G., Mugivhisa L.L. et al. Investigation of Heavy Metal Analysis on Medicinal Plants Used for the Treatment of Skin Cancer by Traditional Practitioners in Pretoria // *Biological Trace Element Research*. – 2024. – Т. 202. – P. 778–786. – DOI: 10.1007/s12011-023-03701-4.
11. Pereira Junior J.B., Carvalho V.S., Ferreira W.Q., Araujo R.G.O., Ferreira S.L.C. Green sample preparation of medicinal herbs in closed digester block for elemental determination by ICP OES // *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*. – 2024. – Т. 238. – Art. 115810. – DOI: 10.1016/j.jpba.2023.115810.
12. Tekman E. Asgarlı T., Yuca H., Atila A., Çeçen Ö., Karakaya S. Exploring Quantitative Biological Major, Trace, and Ultratrace Elements Composition and Qualitative Primary-Secondary Metabolites in Lamiaceae Medicinal Plants from Turkey // *Biological Trace Element Research*. – 2025. – Т. 203. – P. 1188–1201. – DOI: 10.1007/s12011-024-04219-z.
13. Wang T., Rangji C., Liu W., Ma J., Zhou R., Leng L., Zhang Y. Multi-Omics on Traditional Medicinal Plant of the Genus *Aconitum*: Current Progress and Prospect // *Molecules*. – 2025. – Т. 30, № 1. – Art. 118. – DOI: 10.3390/molecules30010118.
14. Wang C., Li H., Sun J. et al. Study on enrichment characteristics of Chinese herbal medicine based on LIBS technology // *Optoelectronics Letters*. – 2023. – Т. 19. – P. 88–94. – DOI: 10.1007/s11801-023-2104-3.
15. Yang D., Wang Y., Shen Y. et al. Assessment of Health Risk from *Aconiti Kusnezoffii* Radix to its Processed Products and Origin Traceability Through Inorganic Element Analysis // *Biological Trace Element Research*. – 2026. – Т. 204. – P. 4987–5001. – DOI: 10.1007/s12011-026-05011-x.

References

1. Agapova N.D. The buttercup family (Ranunculaceae) // *Life of Plants: in 6 volumes, part 1* / edited by A.L. Takhtadzhyan. Moscow: Prosveshchenie. – 1980. – Т. 5. – P. 210–216.
2. Chan Y.-T., Wang N., Feng Y. The toxicology and detoxification of *Aconitum*: traditional and modern views // *Chinese Medicine*. – 2021. – Т. 16. – DOI: 10.1186/s13020-021-00472-9.
3. Douvris C., Vaughan T., Bussan D.D., Bartzas G. et al. How ICP-OES changed the face of trace element analysis: Review of the global application landscape // *Science of the Total Environment*. – 2023. – Т. 905. – Art. 167242. – DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.167242.
4. Ebrahimzadeh G., Omer A.K., Naderi M., Sharafi K. Human health risk assessment of potentially toxic and essential elements in medicinal plants consumed in Zabol, Iran, using the Monte Carlo simulation method // *Scientific Reports*. – 2024. – Т. 14. – Art. 23756. – DOI: 10.1038/s41598-024-75159-w.

5. Häßler M., Wetzel K., Warnecke L. et al. Assessment of the differentiation of *Sambucus nigra* plant parts using a multi-target and suspect screening by LC-HRMS and ICP-OES // *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. – 2025. – T. 417. – P. 6209–6220. – DOI: 10.1007/s00216-025-06112-7.
6. International Plant Names Index (IPNI). *Aconitum talassicum* Popov – URL: <https://www.ipni.org/n/707867-1>. (accessed 04.09.2026)
7. Kakkar R.A., Haneen M.A., Parida A.C., Sharma G. The known, unknown, and the intriguing about members of a critically endangered traditional medicinal plant genus *Aconitum* // *Frontiers in Plant Science*. – 2023. – T. 14. – Art. 1139215. – DOI: 10.3389/fpls.2023.1139215.
8. Ma L., Yang L., Tang L. et al. Sample preparation techniques for quality evaluation and safety control of medicinal and edible plants: Overview, advances, applications, and future perspectives // *Journal of Pharmaceutical Analysis*. – 2025. – T. 15. – Art. 101296. – DOI: 10.1016/j.jpha.2025.101296.
9. Nyirimigabo E., Xu Y., Li Y., Wang Y., Agyemang K., Zhang Y. A review on phytochemistry, pharmacology and toxicology studies of *Aconitum* // *Journal of Pharmacy and Pharmacology*. – 2015. – T. 67, № 1. – P. 1–19. – DOI: 10.1111/jphp.12310.
10. Oladeji O.M., Kopaopa B.G., Mugivhisa L.L. et al. Investigation of Heavy Metal Analysis on Medicinal Plants Used for the Treatment of Skin Cancer by Traditional Practitioners in Pretoria // *Biological Trace Element Research*. – 2024. – T. 202. – P. 778–786. – DOI: 10.1007/s12011-023-03701-4.
11. Pereira Junior J.B., Carvalho V.S., Ferreira W.Q., Araujo R.G.O., Ferreira S.L.C. Green sample preparation of medicinal herbs in closed digester block for elemental determination by ICP OES // *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*. – 2024. – T. 238. – Art. 115810. – DOI: 10.1016/j.jpba.2023.115810.
12. Tekman E. Asgarlı T., Yuca H., Atila A., Çeçen Ö., Karakaya S. Exploring Quantitative Biological Major, Trace, and Ultratrace Elements Composition and Qualitative Primary-Secondary Metabolites in Lamiaceae Medicinal Plants from Turkey // *Biological Trace Element Research*. – 2025. – T. 203. – P. 1188–1201. – DOI: 10.1007/s12011-024-04219-z.
13. Wang T., Rangji C., Liu W., Ma J., Zhou R., Leng L., Zhang Y. Multi-Omics on Traditional Medicinal Plant of the Genus *Aconitum*: Current Progress and Prospect // *Molecules*. – 2025. – T. 30, № 1. – Art. 118. – DOI: 10.3390/molecules30010118.
14. Wang C., Li H., Sun J. et al. Study on enrichment characteristics of Chinese herbal medicine based on LIBS technology // *Optoelectronics Letters*. – 2023. – T. 19. – P. 88–94. – DOI: 10.1007/s11801-023-2104-3.
15. Yang D., Wang Y., Shen Y. et al. Assessment of Health Risk from *Aconiti Kusnezoffii* Radix to its Processed Products and Origin Traceability Through Inorganic Element Analysis // *Biological Trace Element Research*. – 2026. – T. 204. – P. 4987–5001. – DOI: 10.1007/s12011-026-05011-x.

ХИМИЯ ВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И ПОЛИМЕРЫ

УДК 678.84:678.686

DOI: 10.32743/UniChem.2026.147.9.23361

Совершенствование технологии изготовления силиконовых форм на основе аддитивного производства и эпоксидной модификации поверхности мастер-модели

Музычук Евгений Геннадьевич
индивидуальный предприниматель
Российская Федерация, г. Красноярск
E-mail: smolinist@bk.ru

Improvement of silicone mould manufacturing technology based on additive manufacturing and epoxy modification of the master model surface

Muzychuk Evgenii
Individual entrepreneur
Russia, Krasnoyarsk

Аннотация

Цель исследования — разработка и физико-химическое обоснование технологии изготовления эластичных силиконовых форм, в которой мастер-модель получают методом послойного наплавления (FDM), а её рабочую поверхность перед заливкой силикона аддитивного отверждения модифицируют эпоксидной композицией. Методология включала совмещение аддитивного формообразования матрицы, многослойного нанесения эпоксидного связующего на основе диглицидилового эфира бисфенола А с аминным отвердителем, полного отверждения покрытия с термической постобработкой и заливки двухкомпонентного полисилоксана платинового отверждения при контролируемом температурном режиме с вакуумной дегазацией. Оценка проводилась по шероховатости рабочей поверхности, полноте отверждения контактного слоя силикона, точности воспроизведения геометрии и ресурсу формы. Показано, что эпоксидный слой заполняет межслойные каверны матрицы и формирует сплошную сшитую плёнку, устраняющую открытую пористость и механическое сцепление силикона с подложкой. Многоступенчатое нанесение покрытия снижает шероховатость рабочей поверхности матрицы с Ra 10–25 мкм до 0,5–2 мкм при трёх слоях, а отклонения размеров отливки от цифровой модели не превышают 0,7 мм и носят характер систематической усадки. Установлено ключевое ограничение: непрореагировавшие амины покрытия ингибируют платиновый катализатор

Библиографическое описание: Музычук Е.Г. Совершенствование технологии изготовления силиконовых форм на основе аддитивного производства и эпоксидной модификации поверхности мастер-модели // Universum: химия и биология : электрон. научн. журн. 2026. 9(147). URL: <https://7universum.com/ru/nature/archive/item/23361>

гидросилилирования, поэтому обязательны точная стехиометрия, полное отверждение эпоксидного слоя и контрольная проба на совместимость. Практическая значимость подтверждена внедрением: технология обеспечила более чем трёхкратное сокращение продолжительности производственного цикла, на её основе выпущено и реализовано свыше 50 000 единиц продукции. Техническое решение защищено патентом Российской Федерации № 2819935.

Abstract

The aim of the study is to develop and physicochemically justify a technology of manufacturing elastic silicone moulds in which the master model is produced by fused deposition modelling (FDM) and its working surface is modified with an epoxy composition prior to casting an addition-cure silicone. The methodology combined additive shaping of the matrix, multilayer application of a bisphenol A diglycidyl ether epoxy binder with an amine hardener, complete curing of the coating with thermal post-curing, and casting of a two-component platinum-cure polysiloxane under a controlled temperature regime. Evaluation was based on surface roughness, completeness of curing of the silicone contact layer, replication accuracy and mould service life. The epoxy layer fills the interlayer cavities of the matrix and forms a continuous crosslinked film that eliminates open porosity and mechanical interlocking with the substrate. Multilayer coating reduces the roughness of the working surface from Ra 10–25 μm to 0.5–2 μm after three layers, while deviations of the casting from the digital model do not exceed 0.7 mm and reflect systematic shrinkage. A key limitation was also identified: unreacted amines of the coating inhibit the platinum hydrosilylation catalyst, so exact stoichiometry, complete curing of the epoxy layer and a compatibility test cast are mandatory steps. The technology reduced the production cycle time more than threefold, and over 50,000 product units have been manufactured and sold on its basis. The solution is protected by patent of the Russian Federation No. 2819935.

Ключевые слова: силиконовая форма, полисилоксан аддитивного отверждения, платиновый катализатор, ингибирование отверждения, эпоксидное покрытие, FDM-печать, шероховатость поверхности.

Keywords: silicone mould, addition-cure polysiloxane, platinum catalyst, cure inhibition, epoxy coating, FDM printing, surface roughness.

Введение

Мелкосерийное производство и быстрое прототипирование изделий из полимерных, гипсовых, восковых и пищевых литевых композиций опирается на формы из силиконовых каучуков холодного отверждения. Наибольшее значение имеют полисилоксаны аддитивного отверждения: их сшивка идёт по реакции гидросилилирования между Si–H-группами сшивающего агента и винильными группами полидиметилсилоксана в присутствии комплексов платины(0) [4; 8], без побочных продуктов, с усадкой на уровне сотых долей процента и точным копированием микрорельефа модели [9].

Себестоимость и длительность изготовления оснастки определяются этапом получения мастер-модели: ручное моделирование или механическая обработка занимают от нескольких дней до недель. Аддитивное производство удешевляет этот этап, причём наиболее доступной

остаётся технология послойного наплавления (FDM): стоимость оборудования и материалов здесь заметно ниже, чем при механической обработке и стереолитографии (SLA), что и определяет её преобладание в мелкосерийном сегменте. Её ограничение геометрическое: поверхность, сформированная укладкой экструдированных нитей, имеет выраженную периодическую слоистость, а типичные значения Ra составляют единицы и десятки микрометров [5]. Для силиконовой формы дефект критичен вдвойне: эластомер копирует микрорельеф матрицы без потерь, а открытая межслойная пористость вызывает механическое заклинивание силикона в неровностях подложки, из-за чего растёт усилие извлечения матрицы и разрушаются тонкие элементы рельефа.

Методы постобработки FDM-поверхностей — шлифование, абразивно-струйная обработка, термическое выглаживание, парофазное сглаживание, нанесение грунтовок и покрытий — систематизированы в обзорах последних лет [5; 10]. Шлифование трудоёмко и нарушает мелкий рельеф; парофазная обработка эффективна прежде всего для АБС-пластика, даёт размерные искажения и требует работы с летучими токсичными средами [7; 10]. Нанесение эпоксидных композиций универсальнее: покрытие не удаляет материал, а достраивает поверхность, снижая шероховатость и повышая жёсткость матрицы [6].

Однако при переходе к постобработке мастер-модели, контактирующей с платиновым силиконом, возникает химическая проблема, в работах по качеству аддитивных поверхностей практически не обсуждаемая. Катализаторы гидросилилирования на основе платины(0) чувствительны к ингибированию соединениями серы, олова и азота: координация донорного атома по платиновому центру выводит катализатор из цикла, и силикон в контактной зоне не отверждается [8; 9]. Поскольку эпоксидные системы отверждаются преимущественно аминными отвердителями [2], их применение решает задачу шероховатости и одновременно порождает риск неотверждения поверхностного слоя формы; на стыке этих задач и лежит научная проблема работы.

Научная новизна работы состоит в интеграции в единый маршрут аддитивного формообразования мастер-модели, многоступенчатой эпоксидной модификации её поверхности и режимов формирования формы, совместимых с платиновой каталитической системой. Цель исследования — разработка и физико-химическое обоснование такой технологии, обеспечивающей снижение шероховатости и повышение точности воспроизведения геометрии при отсутствии ингибирования катализатора. Задачи: обосновать выбор материалов и последовательность операций; определить режимы нанесения и отверждения эпоксидного слоя, исключающие миграцию аминов в зону контакта с силиконом; установить условия заливки и дегазации; оценить результативность решения по данным внедрения.

Материалы и методы

Материалом мастер-модели служили филаменты для FDM-печати — полилактид (PLA) и полиэтилентерефталатгликоль (PETG), химически инертные к платиновым каталитическим системам в отличие от фотополимерных смол и материалов с серо- и оловоорганическими добавками. Для модификации поверхности применена низковязкая эпоксидная композиция холодного отверждения на основе диглицидилового эфира бисфенола А с аминным отвердителем; отверждение идёт по механизму раскрытия оксиранового цикла первичными

и вторичными аминогруппами с образованием пространственной сетки [2]. Соотношение компонентов задавалось расчётом по эпоксидному эквиваленту смолы и аминному водородному эквиваленту отвердителя; избыток отвердителя недопустим, так как непрореагировавшие аминогруппы сохраняют подвижность в сетке и мигрируют к границе раздела с силиконом.

Материал формы — двухкомпонентный компаунд аддитивного отверждения (RTV-2, платиновая каталитическая система) твёрдостью 20–40 единиц по Шору А. Разделительный состав подбирался из совместимых с платиновыми системами; антиадгезивы на основе латекса и оловоорганических соединений исключены.

Оборудование: 3D-принтеры Bambu Lab A1, Bambu Lab A1 mini и Bambu Lab P1S с соплом 0,4 мм; сушилка филамента Creality Space Pi; сушильный шкаф Razz FD96 мощностью 400 Вт; вакуумная камера собственной сборки с пластинчато-роторным насосом ZSJ-1S мощностью 150 Вт и предельным остаточным давлением 2 Па; весы с погрешностью 0,01 г; штангенциркуль; бесконтактный инфракрасный термометр; оптический микроскоп. Оценка проводилась по четырём показателям: шероховатость рабочей поверхности матрицы (параметр Ra по ГОСТ 2789 – 73 [1]); полнота отверждения контактного слоя силикона; точность воспроизведения геометрии, определявшаяся сопоставлением размеров отливки с исходной цифровой моделью при помощи штангенциркуля; ресурс формы. Приводимые далее значения Ra получены в условиях действующего производства, носят оценочный характер и представлены в виде диапазонов; лабораторная профилометрия на поверенном оборудовании не выполнялась и рассматривается как задача дальнейшей работы. Режимы маршрута приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Технологический маршрут изготовления силиконовой формы на основе FDM-матрицы с эпоксидной модификацией поверхности

№	Операция	Контролируемые параметры и критерии
1	Печать мастер-модели методом FDM	Высота слоя 0,1–0,2 мм; 3–4 периметра; ориентация, минимизирующая поддержки на рабочем рельефе
2	Подготовка поверхности матрицы	Обезжиривание изопропиловым спиртом, сушка 30 мин; ацетон, хлорсодержащие растворители и латекс не применяются
3	Нанесение эпоксидного покрытия в 2–3 слоя	Расчётное соотношение компонентов; первый слой тонкий, с затеканием в каверны; следующие — после гелеобразования предыдущего
4	Полное отверждение покрытия	Выдержка при 23 ± 2 °C не менее 24 ч с постотверждением; критерий — отсутствие липкости и следа на салфетке
5	Контрольная проба на совместимость	Навеска силикона 2–5 г на участок покрытия; критерий — полное отверждение без липкого контактного слоя
6	Разделительный состав и заливка силикона	Температура компонентов и помещения 23 ± 2 °C; вакуумная дегазация; заливка тонкой струёй из одной точки
7	Отверждение формы и распалубка	Выдержка по паспорту компаунда; извлечение матрицы без ударных нагрузок

Результаты и обсуждение

Механизм эпоксидной модификации поверхности. Жидкая эпоксидная композиция под действием капиллярных сил затекает в межслойные впадины и поры FDM-матрицы; впадины заполняются материалом, а свободная поверхность жидкости стремится к минимуму площади, поэтому отверждённый профиль оказывается существенно более сглаженным. Однократное нанесение полного эффекта не даёт: первый слой расходуется на пропитку впадин, поэтому сглаживание достигается лишь при многоступенчатой схеме — каждый следующий слой наносится после гелеобразования предыдущего. Отличие от парофазного сглаживания в том, что материал не растворяется и не перераспределяется, а добавляется: не возникает ни коробления, ни неконтролируемой усадки, а решение не привязано к конкретному термопласту [7; 10]. Второй результат — устранение открытой пористости: густосшитая сетка [2] изолирует силикон от подложки, снимает механическое заклинивание эластомера в неровностях и снижает усилие извлечения мастер-модели; дополнительно возрастают жёсткость и износостойкость матрицы, что позволяет использовать её многократно [6].

Ингибирование платинового катализатора как критический фактор технологии. Отверждение силиконов аддитивного типа — каталитическое присоединение Si–H-групп по кратной связи винилсилоксана; активной формой катализатора служат комплексы платины(0), прежде всего катализатор Карстедта [8]. Цикл, описываемый схемой Чалка — Харрода, включает окислительное присоединение связи Si–H к платиновому центру, координацию винильной группы по вакантному месту, миграционное внедрение и восстановительное элиминирование продукта [8; 9]. Соединения с донорными атомами азота и серы, а также олова конкурентно координируются по тем же местам и выводят катализатор из цикла, причём достаточно количеств, соизмеримых с содержанием металла [9]. Ингибирование локально и практически необратимо: контактный слой остаётся липким неограниченно долго при нормальном отверждении остального объёма, и форма с таким дефектом непригодна к эксплуатации.

Источником риска является аминный отвердитель: пока сшивка не завершена, в покрытии присутствуют подвижные амины, способные мигрировать к поверхности раздела. Отсюда три требования маршрута — точное дозирование компонентов, полное отверждение покрытия с постотверждением и контрольная проба перед заливкой основного объёма. Недопустимые в контакте с платиновыми компаундами вещества и меры их исключения сведены в таблице 2.

Таблица 2.

Ингибиторы платиновой каталитической системы и меры их исключения

Группа веществ	Источники в технологическом процессе	Технологическая мера
Соединения азота (амины, амиды, нитрилы)	Непрореагировавший отвердитель, аминсодержащие грунтовки	Точная стехиометрия, полное отверждение и постотверждение, контрольная проба
Соединения серы и олова	Серосодержащие пластилины, каучук, латексные перчатки, остатки конденсационных силиконов	Нитриловые перчатки, отказ от серосодержащих масс, разделение тары для оловянных и платиновых систем

Группа веществ	Источники в технологическом процессе	Технологическая мера
Фотополимеры, акрилаты, растворители	Матрицы из УФ-смола, акриловые лаки, ацетон, липкие ленты	Термопластичные FDM-матрицы, обезжиривание только изопропиловым спиртом, отказ от липких лент

Режимы заливки и дегазации. Полнота заполнения микрорельефа определяется соотношением вязкости компаунда и времени его жизнеспособности. Повышение температуры снижает вязкость и улучшает смачивание, но ускоряет реакцию, сокращает технологическое окно и усиливает разогрев за счёт экзотермии; компромисс — температура компонентов, оснастки и помещения 23 ± 2 °C. Вакуумная дегазация удаляет вовлечённый воздух, а заливка тонкой струёй из одной точки с максимальной высоты вытесняет его из углублений рельефа снизу вверх.

Количественная оценка. Шероховатость лицевой поверхности FDM-матрицы без обработки составляет Ra 10–25 мкм, что соответствует известным данным для послойного наплавления [5; 10]. Нанесение первого слоя эпоксидной композиции снижает Ra до 3–7 мкм, второго — до 3–5 мкм, третьего — до 0,5–2 мкм. Основной вклад в сглаживание профиля даёт первый слой, заполняющий межслойные каверны; второй слой выравнивает остаточные неровности, а третий формирует практически бездефектную поверхность и определяет качество воспроизведения мелкого рельефа. Размерная точность оценивалась сопоставлением отливки с исходной цифровой моделью: отклонения составили минус 0,4 мм по длине, минус 0,2 мм по ширине и минус 0,7 мм по высоте. Отрицательный знак по всем трём измерениям указывает на систематическую усадку, а не на случайный разброс, поэтому отклонения могут компенсироваться корректировкой размеров цифровой модели. Значения получены для отливок из эпоксидной композиции и изменяются в зависимости от материала отливки и условий проведения работ. Сводная оценка результативности приведена в таблице 3.

Таблица 3.

Показатели качества оснастки при традиционном и предложенном маршрутах

Показатель	FDM-матрица без модификации	FDM-матрица с эпоксидной модификацией
Шероховатость рабочей поверхности, Ra, мкм	10–25	3–7 (один слой); 3–5 (два слоя); 0,5–2 (три слоя)
Отклонение размеров отливки от цифровой модели, мм	Не оценивалось	–0,4 (длина); –0,2 (ширина); –0,7 (высота)
Микрорельеф рабочей поверхности	Периодическая слоистость, воспроизводящая высоту слоя печати	Профиль сглажен сплошным эпоксидным слоем, выступы укладки перекрыты
Извлечение матрицы из формы	Затруднено заклиниванием, риск надрыва тонких элементов	Свободное, без повышенных усилий
Отверждение контактного слоя силикона	Риск ингибирования при загрязнённых подложках	Полное при выдержанном режиме отверждения и положительной пробе
Продолжительность производственного цикла	Принята за базовую	Сокращение более чем в три раза

Результаты согласуются с независимыми данными: полимерные, в том числе эпоксидные, покрытия дают наиболее значительное сглаживание профиля среди неразрушающих методов и, в отличие от абразивной и парофазной обработки, не приводят к потере мелкого рельефа [5; 6; 10]; парофазное сглаживание ограничено по номенклатуре термопластов [7].

Промышленная апробация. Технология внедрена в действующее мелкосерийное производство. Маршрут обеспечил более чем трёхкратное сокращение производственного цикла изготовления литевых изделий по сравнению с традиционной схемой, предполагающей ручное изготовление или механическую обработку мастер-модели. На основе полученных форм произведено и реализовано через маркетплейс свыше 50 000 единиц продукции, что подтверждает устойчивость характеристик оснастки при серийной эксплуатации. Научно-техническая новизна способа защищена патентом Российской Федерации № 2819935 «Способ производства силиконовой формы для отливки изделий» [3].

Заключение

Разработана и обоснована технология изготовления силиконовых форм, объединяющая аддитивное получение мастер-модели, эпоксидную модификацию её рабочей поверхности и заливку полисилоксана аддитивного отверждения при контролируемом температурном режиме. Эпоксидное покрытие выполняет две функции: геометрическую — заполнение межслойных каверн и сглаживание профиля, и барьерную — устранение открытой пористости подложки и механического сцепления с ней эластомера. Многоступенчатое нанесение покрытия снижает шероховатость рабочей поверхности матрицы с Ra 10–25 мкм до 3–7 мкм после первого слоя и до 0,5–2 мкм после третьего, а отклонения размеров отливки от цифровой модели не превышают 0,7 мм и носят характер систематической усадки, компенсируемой корректировкой модели.

Ключевое ограничение совмещения аминно-эпоксидных композиций с силиконами платинового отверждения — ингибирование каталитической системы непрореагировавшими аминами. Оно исключается точным соблюдением стехиометрии, полным отверждением покрытия с постотверждением и контрольной пробой, введённой в маршрут как самостоятельная стадия. Условия заливки, обеспечивающие полноту воспроизведения микрорельефа, включают температуру компонентов и оснастки 23 ± 2 °С, вакуумную дегазацию и заливку тонкой струёй из одной точки.

Результативность подтверждена внедрением: продолжительность производственного цикла сокращена более чем втрое, на основе полученных форм выпущено и реализовано свыше 50 000 единиц продукции. Технология сохраняет низкую себестоимость, не требует специального оборудования и применима в прототипировании и мелкосерийном производстве изделий из полимерных, восковых, гипсовых и пищевых композиций.

Список литературы

1. ГОСТ 2789–73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. – М.: Стандартинформ, 2006. – 7 с.

2. Ли Х., Невилл К. Справочное руководство по эпоксидным смолам: пер. с англ. – М.: Энергия, 1973. – 415 с.
3. Пат. 2819935 Российская Федерация. Способ производства силиконовой формы для отливки изделий / Е.Г. Муzychuk. – 2024.
4. Соболевский М.В., Музовская О.А., Попелева Г.С. Свойства и области применения кремнийорганических продуктов. – М.: Химия, 1975. – 296 с.
5. Hashmi A.W., Mali H.S., Meena A. A comprehensive review on surface quality improvement methods for additively manufactured parts // *Rapid Prototyping Journal*. – 2023. – Т. 29, № 3.
6. Hiremath S., Dsouza J.F., Chiniwar D.S., Vasudeva H.M., Mallikarjuna B. Exploring the impact of epoxy coated 3D-printed polymers on surface roughness and mechanical behavior: an experimental and numerical study // *Results in Engineering*. – 2024. – Т. 23. – DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102779.
7. Lavecchia F., Guerra M.G., Galantucci L.M. Chemical vapor treatment to improve surface finish of 3D printed polylactic acid (PLA) parts realized by fused filament fabrication // *Progress in Additive Manufacturing*. – 2022. – Т. 7, № 1.
8. Lewis L.N., Stein J., Gao Y., Colborn R.E., Hutchins G. Platinum catalysts used in the silicones industry // *Platinum Metals Review*. – 1997. – Т. 41, № 2.
9. Troegel D., Stohrer J. Recent advances and actual challenges in late transition metal catalyzed hydrosilylation of olefins from an industrial point of view // *Coordination Chemistry Reviews*. – 2011. – Т. 255, № 13.
10. Wilson V.H. [et al.]. Vapour polishing of fused deposition modelling (FDM) parts: a critical review of different techniques, and subsequent surface finish and mechanical properties of the post-processed 3D-printed parts // *Progress in Additive Manufacturing*. – 2023. – Т. 8.

References

1. [Surface roughness. Parameters and characteristics]. Moscow: Standartinform, 2006. 7 P. (In Russ.)
2. Lee H., Neville K. [Handbook of epoxy resins: transl. from English]. Moscow: Energiya, 1973. 415 P. (In Russ.)
3. E.G. Muzychuk. Patent RU 2819935. [Method for producing a silicone mould for casting products]. – 2024. (In Russ.)
4. Sobolevskiy M.V., Muzovskaya O.A., Popeleva G.S. [Properties and fields of application of organosilicon products]. Moscow: Khimiya, 1975. 296 P. (In Russ.)
5. Hashmi A.W., Mali H.S., Meena A. A comprehensive review on surface quality improvement methods for additively manufactured parts // *Rapid Prototyping Journal*. – 2023. – Т. 29, № 3.
6. Hiremath S., Dsouza J.F., Chiniwar D.S., Vasudeva H.M., Mallikarjuna B. Exploring the impact of epoxy coated 3D-printed polymers on surface roughness and mechanical behavior: an experimental and numerical study // *Results in Engineering*. – 2024. – Т. 23. – DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102779.

7. Lavecchia F., Guerra M.G., Galantucci L.M. Chemical vapor treatment to improve surface finish of 3D printed polylactic acid (PLA) parts realized by fused filament fabrication // Progress in Additive Manufacturing. – 2022. – Т. 7, № 1.
8. Lewis L.N., Stein J., Gao Y., Colborn R.E., Hutchins G. Platinum catalysts used in the silicones industry // Platinum Metals Review. – 1997. – Т. 41, № 2.
9. Troegel D., Stohrer J. Recent advances and actual challenges in late transition metal catalyzed hydrosilylation of olefins from an industrial point of view // Coordination Chemistry Reviews. – 2011. – Т. 255, № 13.
10. Wilson V.H. [et al.]. Vapour polishing of fused deposition modelling (FDM) parts: a critical review of different techniques, and subsequent surface finish and mechanical properties of the post-processed 3D-printed parts // Progress in Additive Manufacturing. – 2023. – Т. 8.

Статья поступила в редакцию: 09.08.2026

Статья принята к публикации: 15.08.2026

Статья опубликована: 07.09.2026

УДК 665.7+660.3

DOI: 10.32743/UniChem.2026.147.9.23326

Подготовка контактного газа окислительной конденсации метана для последующих нефтехимических синтезов

Турсунова Наргиза Самаритдиновна

PhD, доц.

кафедры химии полимеров и химической технологии, Самаркандский государственный

университет имени Шарофа Рашидова

Республика Узбекистан, г. Самарканд

E-mail: t-nargiza2019@mail.ru

Preparation of contact gas from oxidative coupling of methane for subsequent petrochemical syntheses

Tursunova Nargiza Samaritdinovna

PhD, Associate Professor

Department of Polymer Chemistry and Chemical Technology Samarkand State University named

after Sharof Rashidov

Uzbekistan, Samarkand

Аннотация

В статье рассматриваются технологические возможности подготовки этиленсодержащего контактного газа, образующегося при окислительной конденсации метана, для последующих нефтехимических синтезов без глубокой криогенной сепарации. Цель исследования заключается в обосновании последовательности технологических операций, обеспечивающих получение безопасного, стабильного и приемлемого по составу газового потока для дальнейшей переработки. Методологическая основа работы включает сравнительный анализ современных технологических решений по очистке и подготовке контактного газа, а также сопоставление вариантов выделения высокочистого этилена и прямого использования этиленсодержащего потока по критериям энергоемкости, капиталоемкости, технологической интеграции и промышленной применимости. Рассмотрены конденсация водяного пара, абсорбция CO_2 растворами K_2CO_3 , моноэтаноламина (МЭА) и метилдиэтаноламина (МДЭА), контроль остаточного кислорода, осушка газа, конверсия CO водяным паром и последующее метанирование. Установлено, что последовательность этих стадий должна определяться составом исходного газа, требованиями последующего синтеза и условиями работы компрессорного оборудования.

Библиографическое описание: Турсунова Н.С. Подготовка контактного газа окислительной конденсации метана для последующих нефтехимических синтезов // Universum: химия и биология : электрон. научн. журн. 2026. 9(147). URL: <https://7universum.com/ru/nature/archive/item/23326>

Прямое использование контактного газа позволяет сократить число стадий глубокой сепарации и создать условия для рекуперации тепла. Практическая значимость подхода состоит в возможности технологической интеграции очистки и последующего синтеза, тогда как потенциальное снижение энергетических и капитальных затрат требует отдельной технико-экономической оценки.

Abstract

This article examines technological approaches to preparing ethylene-containing contact gas produced during oxidative coupling of methane for subsequent petrochemical syntheses without deep cryogenic separation. The study aims to substantiate a sequence of processing steps that can provide a safe, stable, and compositionally acceptable gas stream for further conversion. The methodology is based on a comparative analysis of current gas-treatment and process-integration approaches, including high-purity ethylene recovery and the direct use of ethylene-containing contact gas, with emphasis on energy demand, capital intensity, integration potential, and industrial applicability. The preparation scheme includes water-vapor condensation, CO₂ absorption with K₂CO₃, monoethanolamine (MEA), or methyldiethanolamine (MDEA), residual oxygen control, gas drying, CO conversion by the water-gas shift reaction, and subsequent methanation. The analysis shows that the sequence of these operations should be selected according to feed-gas composition, downstream synthesis requirements, and compressor operating conditions. Direct use of contact gas can reduce the number of deep-separation stages and create opportunities for heat recovery, whereas potential reductions in energy and capital costs require a separate techno-economic assessment.

Ключевые слова: окислительная конденсация метана, контактный газ, этилен, конверсия водяного газа, абсорбция диоксида углерода, метанирование, технологическая интеграция.

Keywords: oxidative coupling of methane, contact gas, ethylene, water gas shift, carbon dioxide absorption, methanation, process integration.

Введение

Глубокая химическая переработка природного газа является одним из актуальных направлений современной химической технологии, ориентированным на получение продуктов с высокой добавленной стоимостью [6]. Одним из перспективных способов прямой конверсии метана является окислительная конденсация метана (ОКМ), позволяющая получать C₂-углеводороды, прежде всего этан и этилен [1; 3; 8; 9; 11]. В отличие от многостадийных маршрутов, данный процесс позволяет исключить промежуточные стадии получения синтез-газа и метанола [1; 3].

Одним из экономически значимых направлений использования этилена, полученного методом ОКМ, является его вовлечение в процессы алкилирования изобутана. После очистки, сжатия, удаления CO₂ и организации рециркуляции этиленсодержащий контактный газ может поступать в реактор синтеза изопарафиновых компонентов [2; 4; 7]. Алкилирование олефинов изоалканами в присутствии соответствующих катализаторов позволяет получать высокооктановые компоненты моторных топлив. Таким образом,

технологии ОКМ можно рассматривать не только как способ получения этилена, но и как интегрированную платформу превращения метана в жидкие топливные компоненты и нефтехимические полупродукты [2; 4; 7].

Контактный газ такого состава может рассматриваться как промежуточное сырьё для производства этиленоксида, этилбензола, 1,2-дихлорэтана и винилхлорида, винилацетата, а также для процессов алкилирования изобутана олефинами. При этом для каждого из указанных направлений требования к содержанию CO, CO₂, O₂, H₂O, CH₄ и других компонентов контактного газа должны устанавливаться отдельно с учётом особенностей последующего технологического процесса. Близкие по типу многокомпонентные этиленсодержащие газовые потоки формируются при паровом крекинге углеводородов и в процессах переработки крекинг-газа, где также требуются удаление примесей, осушка и селективное выделение либо дальнейшее использование этилена [5; 10].

Цель исследования заключается в обосновании технологической последовательности подготовки этиленсодержащего контактного газа ОКМ для его последующего использования в нефтехимических синтезах без глубокой криогенной сепарации. Для достижения поставленной цели проведено сравнение вариантов выделения высокочистого этилена и прямого использования контактного газа, рассмотрены основные стадии удаления CO, CO₂, водяного пара и остаточного кислорода, а также проанализированы возможности тепловой и технологической интеграции отдельных стадий процесса. Элемент научной новизны работы состоит в систематизации требований к подготовке контактного газа ОКМ по единой технологической схеме и в сопоставлении вариантов его дальнейшего использования с учётом состава газа, глубины очистки и требований последующего синтеза.

Материалы и методы

В качестве исходных материалов использованы современные научные публикации и технологические данные, посвящённые окислительной конденсации метана, очистке этиленсодержащих газовых смесей, выделению этилена и его последующему использованию в нефтехимических процессах. В работе применены методы сравнительного технологического анализа и структурно-функционального сопоставления технологических схем. Варианты получения концентрированного этилена и прямого использования контактного газа сопоставлялись по чистоте целевого продукта, потенциалу энергосбережения, капиталоемкости, простоте технологической интеграции и промышленной адаптируемости.

Результаты и обсуждение

В современном научно-техническом подходе подготовка этиленсодержащего контактного газа рассматривается не как отдельный вспомогательный этап, а как центральное звено концепции использования этилена без его глубокого разделения. Следовательно, схема удаления CO_x из контактного газа должна быть разработана с учетом давления в реакторе, состава газа, использования тепла, баланса водяного пара, материала компрессора, регенерации абсорбента и чувствительности последующего каталитического синтеза к CO и CO₂.

При прямом использовании контактного газа не требуется глубокое криогенное разделение этилена; при этом этилен, содержащийся в контактном газе, полученном в реакторе ОКМ, может использоваться непосредственно либо после частичной очистки в последующих химических синтезах. Данный подход характеризуется повышенной энергоэффективностью и сокращением числа технологических стадий. Такая концепция особенно перспективна для процессов, в которых не требуется высокая степень чистоты этилена, либо когда присутствующие в газовой смеси метан, этан, СО и H_2 могут выполнять роль инертных или балластных компонентов реакционной среды.

Основная цель концепции контактного газа заключается не в достижении максимальной очистки этилена, а в доведении газовой смеси до безопасного, стабильного и приемлемого состава для последующей реакции. При этом происходит конденсация водяного пара, снижение содержания CO_2 до требуемого уровня, контроль остаточного кислорода, отделение компонентов, отравляющих катализатор, и подача газового потока в следующий реактор синтеза.

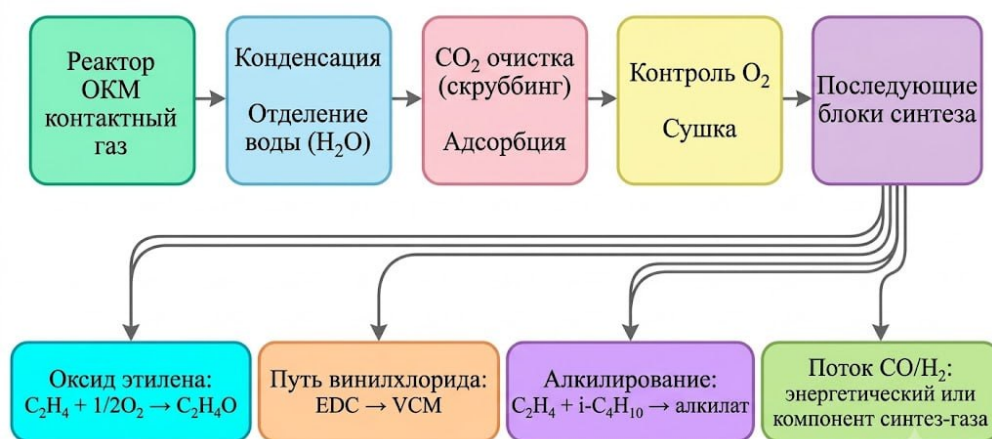


Рисунок 1. Поэтапная подготовка и интеграция контактного газа без глубокого разделения этилена

Этилен, содержащийся в контактном газе, может быть использован для получения этиленоксида, этилбензола, 1,2-дихлорэтана и винилхлорида, винилацетата, а также продуктов алкилирования. При этом требования к остаточному содержанию O_2 , CO_2 , воды и других примесей должны определяться отдельно для каждого последующего процесса с учётом его селективности, каталитической чувствительности и требований безопасности.

Этилен, образующийся в процессе ОКМ, может либо выделяться в виде высокочистого продукта, либо использоваться в составе предварительно подготовленного контактного газа. Получение этилена полимеризационной чистоты требует сжатия, криогенного охлаждения и многоступенчатого разделения, что усложняет технологическую схему и повышает её энергоёмкость.

Прямое использование контактного газа позволяет исключить часть стадий глубокой сепарации и адаптировать состав потока к требованиям последующего синтеза. При этом метан, водород, СО, CO_2 , водяной пар и остаточный кислород могут влиять на активность катализаторов, селективность и безопасность процесса, поэтому допустимое содержание

примесей должно определяться индивидуально для каждого направления. Потенциальное снижение энергетических и капитальных затрат требует отдельной технико-экономической оценки.

Недавние научные исследования процесса ОКМ показывают, что фундаментальной проблемой этого процесса является высокая стабильность молекулы метана и более легкое окисление образующихся продуктов C2 по сравнению с метаном. Следовательно, при высоких степенях конверсии селективность снижается. На практике такая ситуация направляет работу реактора не на однократное достижение высокой степени конверсии, а на стратегию умеренной конверсии, высокой селективности, рециркуляции метана и быстрого удаления продукта [1; 3; 8; 9; 11].

Наиболее актуальной проблемой с точки зрения технологической интеграции является преобразование низкой концентрации этилена в газообразном продукте ОКМ в экономически выгодный поток продуктов. Поэтому все большую значимость приобретают такие решения, как прямое использование контактного газа, адсорбционное обогащение этиленом, мембранная сепарация, внутреннее повторное использование тепла, а также оценка потоков CO и H₂ в качестве синтез-газа.

Расположение установки конверсии CO относительно компрессора является одним из важнейших проектных решений в очистке технологических газов ОКМ. Если установка конверсии водяного газа расположена после компрессора, последующая стадия абсорбции CO₂ облегчается за счет более высокого давления, но компрессор работает с CO₂-содержащим, влажным и высокотемпературным газом. Такие условия повышают риск карбонильного коррозионного воздействия, механического воздействия конденсата и требуют использования специальных материалов.

Если конверсия CO осуществляется перед компрессором, через компрессор проходит газ с изменённым содержанием CO и CO₂, что влияет на требования к последующей очистке и конструкционным материалам. Однако этот вариант требует достаточного охлаждения и осушения газа, иначе влага может вызвать эрозию, кавитацию и повреждение рабочих элементов компрессора. Поэтому в практическом проектировании оптимальный вариант выбирается в зависимости от исходного состава газа, содержания CO₂, баланса водяного пара, типа абсорбента CO₂ и материала компрессора.

Вариант А: Конверсия CO после компрессора



Вариант Б: Конверсия CO перед компрессором



Рисунок 2. Два технологических варианта размещения блока преобразования CO относительно компрессора

Поскольку процесс ОКМ имеет ярко выраженную экзотермическую природу, блок синтеза этилена спроектирован не только с реактором и каталитическим слоем, но и с системами рекуперации тепла, генерации пара, охлаждения газа и отделения конденсата. Использование тепла высокотемпературного контактного газа позволяет генерировать технологический пар, использовать его для регенерации абсорбента и других теплопотребляющих операций, а также снизить общее энергопотребление процесса.

Контактный газ ОКМ представляет собой многокомпонентную смесь, содержащую этилен, этан, непрореагировавший метан, CO, CO₂, H₂, водяной пар и остаточный кислород. Целевым компонентом является этилен, поэтому для ограничения его дальнейшего окисления необходимо контролировать подачу кислорода, время контакта и обеспечить быстрое охлаждение реакционной смеси. Непрореагировавший метан целесообразно возвращать в реактор, тогда как содержание остаточного кислорода должно строго контролироваться с учётом требований взрывобезопасности.

Очистка газа включает высокотемпературную конверсию CO при 400–450 °C на железо-хромовом катализаторе и последующую низкотемпературную конверсию при 200–250 °C на медь-цинк-алюминиевом катализаторе. Образовавшийся CO₂ удаляют растворами K₂CO₃, МЭА или МДЭА, остаточный CO — метанированием на Ni/Al₂O₃ при 200–400 °C. Завершающая осушка молекулярными ситами, оксидом алюминия или конденсацией обеспечивает защиту компрессорного и каталитического оборудования от влаги.

Заключение

Проведённый анализ показал, что этиленсодержащий контактный газ ОКМ может быть подготовлен для последующего использования в синтезе этиленоксида, этилбензола, 1,2-дихлорэтана, винилхлорида, винилацетата и продуктов алкилирования без обязательного выделения этилена высокой чистоты. Выбор глубины очистки определяется требованиями конкретного последующего процесса к содержанию CH₄, C₂H₆, H₂, CO, CO₂, H₂O и остаточного O₂.

Рациональная схема подготовки включает отделение воды, конверсию CO, абсорбцию CO₂, метанирование остаточного CO и окончательную осушку газа. Размещение блока конверсии CO относительно компрессора должно учитывать состав и давление газа, водяной баланс, тип абсорбента и конструкционные материалы. Рециркуляция непрореагировавшего метана и рекуперация тепла повышают степень технологической интеграции процесса, тогда как экономический эффект прямого использования контактного газа требует отдельной технико-экономической оценки.

Список литературы

1. Alkathiri R., Alshamrani A., Wazeer I., Boumaza M., Hadj-Kali M.K. Optimization of the Oxidative Coupling of Methane Process for Ethylene Production // Processes. – 2022. – Т. 10, № 6. – Art. 1085. – DOI: 10.3390/pr10061085.

2. Cao P., Zheng W., Sun W., Zhao L. The Shape Selectivity of Zeolites in Isobutane Alkylation: An Investigation Using CBMC and MD Simulations // *Chemical Engineering Science*. – 2021. – Т. 245. – Art. 116966. – DOI: 10.1016/j.ces.2021.116966.
3. Da Ros S., Fontoura T.B., Schwaab M. de Jesus N.J.C., Pinto J.C. Oxidative Coupling of Methane for Ethylene Production: Reviewing Kinetic Modelling Approaches, Thermodynamics and Catalysts // *Processes*. – 2021. – Т. 9, № 12. – Art. 2196. – DOI: 10.3390/pr9122196.
4. Ethylene to Alkylate Process by Next Wave Energy // *S&P Global Process Economics Program Review*. – 2020.
5. Gholami Z., Gholami F. Tišler Z., Vakili M. A Review on the Production of Light Olefins Using Steam Cracking of Hydrocarbons // *Energies*. – 2021. – Т. 14, № 23. – Art. 8190. – DOI: 10.3390/en14238190.
6. Jiang J. et al. Methyl Radical Dominated Highly Selective Methane Oxidation to Liquid Oxygenates // *Journal of the American Chemical Society*. – 2025. – Т. 147, № 39. – DOI: 10.1021/jacs.5c13767.
7. Jin M., Oh M., Choi M. Hierarchical BEA Zeolite with Trimodal Micro-/Meso-/Macroporosity as a Selective and Long-Lived Catalyst for Isobutane/2-Butene Alkylation // *ACS Catalysis*. – 2022. – Т. 12, № 7. – DOI: 10.1021/acscatal.1c05786.
8. Karsten T., Perez Ortiz A., Schomäcker R., Repke J.-U. Performance Evaluation of Different Reactor Concepts for the Oxidative Coupling of Methane on Miniplant Scale // *Methane*. – 2025. – Т. 4, № 4. – DOI: 10.3390/methane4040025.
9. Kim M., Arndt S., Yildiz M., Schomäcker R., Görke O., Repke J.-U., Wozny G., Godini H.R. Reaction Engineering of Oxidative Coupling of Methane: Experimental Observations and Analysis of the Impacts of Operating Parameters // *Chemical Engineering Research and Design*. – 2021. – Т. 172. – DOI: 10.1016/j.cherd.2021.04.029.
10. Peng X., Zhao L., Peng Y.-L., Deng C., Andaloussi Y.H., Pan H., Tian Y.-J., Zou J.-S., Krishna R., Liu B., Deng C., Xiao P., Sun C., Zaworotko M.J., Chen G., Zhang Z. One-Step Ethylene Purification from a Seven-Component Cracking Gas Mixture with Sorbent-Sorbate Induced-Fit // *CCS Chemistry*. – 2025. – Т. 7, № 4. – DOI: 10.31635/ccschem.024.202403977.
11. Wadkar C., Kumar A., Lee H., Rollins B., Grosjean N., Singh S., Northrop W.F. Computational Study on the Effect of Thermal Boundary Conditions and Axial Aspect Ratio on Catalytic Oxidative Coupling of Methane // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 2023. – Т. 62, № 46. – DOI: 10.1021/acs.iecr.3c02285.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК

UNIVERSUM: ХИМИЯ И БИОЛОГИЯ

Электронный научный журнал

№ 9(147)

Сентябрь 2026 г.

Часть 1

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: 88 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: 07.09.2026

Журнал размещается в:

CYBERLENINKA

НАУЧНАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ
БИБЛИОТЕКА
eLIBRARY.RU

Google
scholar

ULRICHSWEB
GLOBAL SERIALS DIRECTORY

>BASE

СОЦИОНЕТ

OpenAIRE



[Registry of Open Access
Repositories \(ROAR\)](#)