

8(149)

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

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

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

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

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



165 ЛЕТ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ
9 августа 2026 г.

ЧАПЛИН
ВЛАДИМИР МИХАЙЛОВИЧ
1861-1931 гг.



UNIVERSUM: ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Научный журнал

Издается ежемесячно с ноября 2013 года

Выпуск: 8(149)

Август 2026 г.

Часть 2

Новосибирск
2026

Главный редактор журнала:

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

Редакционная коллегия:

Абдуллин Тимур Зуфарович – канд. техн. наук;

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

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

Мартышкин Алексей Иванович – канд. наук, доц.;

Мерганов Аваз Мирсултанович – PhD;

Немирова Любовь Федоровна – канд. техн. наук, доц.;

Полтавец Валерий Васильевич – д-р техн. наук, доц.;

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

Старченко Ирина Борисовна – д-р техн. наук, проф.;

Усманов Хайрулла Сайдуллаевич – д-р техн. наук, проф.;

Фозилов Садриддин Файзуллаевич – д-р техн. наук, проф.;

Шайтура Сергей Владимирович – канд. техн. наук, доц.;

Яронова Наталья Валерьевна – канд. техн. наук, доц.;

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

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

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

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

U55 Universum: технические науки : электронный научный журнал. — № 8(149). — Часть 2. — Новосибирск : Изд-во «Юниверсум», 2026. — 64 с. — Текст : электронный. — URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/category/8149> (дата публикации: 28.08.2026).

Содержание

Статьи на русском языке

Промышленность и производство

Химические технологии и химическая промышленность

Получение коагулянта на основе хлорида железа (III) из железосодержащей руды Кызылкумского региона <i>Баракаев Мухриддин Бобошерович</i>	4
Получение сложных удобрений из низкосортных фосфоритов с использованием фосфогипса и глауконита <i>Джумабаев Расулбек Фарход угли Реймов Ахмед Мамбеткаримович Курбаниязов Рашид Калбаевич Кыстаубаева Молдир Артыкбаевна Ережепова Бибинур Курбаназар кизи</i>	12
Получение и свойства олигомерных соединений, содержащих серу и азот на основе эпихлоргидрина и 2,4,6-триметил-1,3,5-триазина <i>Логинов Антон Викторович Шодиева Маъмура Рауповна Шарипов Бегмурод Шаропович</i>	26
Экспериментальное исследование процесса получения коагулянта методом кислотного разложения руды месторождения Тебинбулак <i>Мансурова Шабнам Мирзохид кизи</i>	36
Изменения нефтэмульсии месторождения «Совлигор» по данным ИК-спектроскопии после обработки дезмульгатором <i>Негматов Сайибжан Садыкович Исмаилов Равшан Исраилович Негматова Комила Сайибжановна Раупова Дилфуза Нуруллаевна Мусабеков Дилшод Хакимович Рахимов Хуршид Юлдашевич</i>	43
Жидкофазная экстракция гуминовых и фульвокислот из сапропеля, отобранного на высохшем дне Аральского моря, раствором гидроксида калия <i>Рашитова Шахноза Шухрат кизи Амонова Матлуба Мухтаровна</i>	53

СТАТЬИ НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ

ПРОМЫШЛЕННОСТЬ И ПРОИЗВОДСТВО

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ХИМИЧЕСКАЯ
ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

Статья поступила в редакцию: 26.06.2026

Статья принята к публикации: 31.07.2026

Статья опубликована: 28.08.2026

УДК 661.152

**Получение коагулянта на основе хлорида железа (III) из железосодержащей
руды Кызылкумского региона**

Баракаев Мухриддин Бобошерович

докторант (PhD)

Навоийский государственный горно-технологический университет

Республика Узбекистан, г. Навои

E-mail: nazira.akhmedova.68@bk.ru

**Production of an iron (III) chloride-based coagulant from iron-bearing ore of
the Kyzylkum region**

Barakaev Muxriddin Bobosherovich

Doctoral student (PhD)

Navoi State University of Mining and Technologies

Republic of Uzbekistan, Navoi

Аннотация

В работе исследована возможность получения раствора коагулянта на основе хлорида железа (III) из железосодержащей руды Сарибатырского месторождения Кызылкумского региона. Химический состав исходного минерального сырья определяли с применением гравиметрических, титриметрических, комплексонометрических и фотометрических методов анализа. Установлено, что основными компонентами руды являются SiO_2 и Fe_2O_3 , массовая доля которых составляет соответственно 38,2 и 30,0 %. Кислотное разложение проводили 30 %-ным раствором соляной кислоты при крупности частиц менее 1 мм, скорости перемешивания 150 – 200 об/мин, продолжительности процесса 30, 60 и 120 мин и массовых соотношениях «руда: HCl» 1:1, 1:2 и 1:3. Показано, что при соотношении 1:1 в твердом

Библиографическое описание: Баракаев М.Б. Получение коагулянта на основе хлорида железа (III) из железосодержащей руды Кызылкумского региона // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 8(149). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23270>

остатке сохраняется 20,5 % Fe_2O_3 , что свидетельствует о недостаточном расходе кислоты. При соотношении 1:2 и продолжительности обработки 120 мин остаточное содержание Fe_2O_3 снижается до 0,41 %, а полученный раствор содержит 32,0 % FeCl_3 и характеризуется динамической вязкостью 2,6 мПа·с. Увеличение расхода кислоты до соотношения 1:3 приводит к разбавлению конечного продукта. На основании совокупности исследованных показателей режим при соотношении «руда: HCl » 1:2 и продолжительности 120 мин определен как рациональный в пределах изученного диапазона. Полученные результаты подтверждают перспективность использования местного железосодержащего сырья для производства растворов хлорида железа (III). Для подтверждения эффективности продукта как коагулянта необходимы последующие испытания на модельных и реальных сточных водах.

Abstract

This study investigates the feasibility of producing an iron(III) chloride-based coagulant solution from iron-bearing ore of the Saribatyr deposit in the Kyzylkum region. The chemical composition of the initial mineral raw material was determined using gravimetric, titrimetric, complexometric, and photometric analytical methods. The major components of the ore were found to be SiO_2 and Fe_2O_3 , with mass fractions of 38.2 % and 30.0 %, respectively. Acid leaching was carried out using a 30 % hydrochloric acid solution at a particle size of less than 1 mm, a stirring rate of 150–200 rpm, treatment times of 30, 60, and 120 min, and ore-to- HCl mass ratios of 1:1, 1:2, and 1:3. At an ore-to- HCl ratio of 1:1, the solid residue retained 20.5 % Fe_2O_3 , indicating an insufficient amount of acid. At a ratio of 1:2 and a treatment time of 120 min, the residual Fe_2O_3 content decreased to 0.41 %, while the resulting solution contained 32.0 % FeCl_3 and had a dynamic viscosity of 2.6 mPa·s. Increasing the acid dosage to a ratio of 1:3 resulted in dilution of the final product. Based on the combined experimental parameters, an ore-to- HCl ratio of 1:2 and a treatment time of 120 min were identified as rational within the investigated range. The obtained results demonstrate the potential of using local iron-bearing raw materials for the production of iron(III) chloride solutions. Further tests using model and real wastewater are required to confirm the effectiveness of the resulting product as a coagulant.

Ключевые слова: железосодержащая руда, хлорид железа (III), коагулянт, соляная кислота, кислотное выщелачивание, Сарибатырское месторождение, Кызылкумский регион, нерастворимый остаток.

Keywords: iron-bearing ore, iron(III) chloride, coagulant, hydrochloric acid, acid leaching, Saribatyr deposit, Kyzylkum region, insoluble residue.

Введение

Рост промышленного производства сопровождается образованием сточных вод, содержащих взвешенные и коллоидно-дисперсные частицы, соединения металлов, нефтепродукты и органические загрязнители. Для удаления таких компонентов широко применяют реагентную коагуляцию солями алюминия и железа [6, 2, 9].

В Кызылкумской территории ведется систематизация и цифровизация геологических данных крупных рудных месторождений [1], что повышает доступность информации о местной минерально-сырьевой базе для прикладных исследований.

Анализ литературы показывает, что кислотное выщелачивание применяется для перевода соединений железа и других металлов из твердой фазы в раствор [3, 8]. Вместе с тем для конкретного сырья требуется установить технологически приемлемое соотношение твердой и жидкой фаз, продолжительность контакта и состав получаемого раствора.

В настоящей работе оценивается только стадия получения раствора FeCl_3 из местного железосодержащего сырья. Эффективность очистки промышленных сточных вод не заявляется, поскольку испытания полученного продукта на реальных водах не проводились.

Цель исследования - установить возможность получения коагулянта на основе хлорида железа (III) из местного железосодержащего сырья и выбрать рациональный режим кислотного разложения среди изученных вариантов.

Для достижения цели решались следующие задачи:

- определить химический состав исходной руды и указать примененные методы анализа;
- исследовать влияние продолжительности процесса и соотношения «руда : HCl » на переход железа в раствор;
- описать технологическую схему получения раствора FeCl_3 ;
- сформулировать критерии выбора рационального режима и ограничения исследования.

Материалы и методы

Объектом исследования являлась железосодержащая руда Сарибатырского месторождения Кызылкумского региона Республики Узбекистан. Перед экспериментами пробу дробили, измельчали до класса менее 1 мм, перемешивали для усреднения и высушивали до постоянной массы.

В качестве реагентов применяли 30 %-ный раствор соляной кислоты (HCl), серную кислоту (H_2SO_4) квалификации «х.ч.» для вспомогательной корректировки условий растворения и дистиллированную воду. Серная кислота не являлась основным выщелачивающим реагентом в рассматриваемой серии опытов.

Для подготовки пробы, проведения кислотного разложения и аналитического контроля использовали: лабораторную щековую дробилку ШД-6 и дисковый истиратель ИД-200 с контрольным ситом с размером ячеек 1,0 мм; аналитические весы OHAUS Pioneer PX224/E с наибольшим пределом взвешивания 220 г и дискретностью 0,0001 г; магнитную мешалку IKA C-MAG HS 7 с регулируемой частотой вращения 100 – 1500 об/мин; настольный рН-метр HANNA Instruments HI5221 с комбинированным стеклянным электродом и датчиком температуры, обеспечивающим автоматическую температурную компенсацию; фотоэлектрический фотометр КФК-3-01; сушильный шкаф СНОЛ 58/350; вакуумную фильтрационную установку, состоящую из воронки Бюхнера, колбы Бунзена и мембранного вакуумного насоса KNF N 86 KT.18; набор лабораторных ареометров АОН-1 и ротационный вискозиметр Brookfield DV2T-LV с адаптером UL для низковязких жидкостей. Кислотное

разложение проводили в реакторе из боросиликатного стекла вместимостью 1,0 дм³; для дозирования растворов применяли мерные колбы, цилиндры и пипетки класса точности А. Перед измерениями аналитические весы проверяли по калибровочным гилям, рН-метр калибровали по стандартным буферным растворам, фотометр – по холостому раствору и градуировочным зависимостям; остальные приборы подготавливали и проверяли в соответствии с эксплуатационной документацией.

Химический состав исходной пробы определяли комбинированным методом: содержание SiO₂ – гравиметрически после кислотного разложения; общее железо с пересчетом на Fe₂O₃ – титриметрически после восстановления в соответствии с ISO 2597 – 2:2019 [4]; CaO и MgO – комплексонометрически; Al₂O₃, MnO и V₂O₅ – фотометрически по предварительно построенным градуировочным зависимостям с проведением холостого опыта. Массовую долю нерастворимого остатка определяли гравиметрически после фильтрования, промывки дистиллированной водой, высушивания до постоянной массы и взвешивания.

Содержание FeCl₃ в растворе рассчитывали по определенному содержанию общего железа с учетом стехиометрического коэффициента $M(\text{FeCl}_3)/M(\text{Fe}) = 162,20/55,85$. Водородный показатель измеряли потенциометрически, плотность – ареометрически, динамическую вязкость – ротационным методом с использованием адаптера для низковязких жидкостей.

Навеску подготовленной руды помещали в кислотостойкий стеклянный реактор и добавляли 30 %-ный раствор HCl в массовых соотношениях «руда : HCl» 1:1, 1:2 и 1:3. Реакционную смесь перемешивали со скоростью 150-200 об/мин в течение 30, 60 или 120 мин. После завершения выщелачивания суспензию фильтровали; фильтрат анализировали как раствор железосодержащего коагулянта, а твердый остаток промывали, высушивали и исследовали на остаточное содержание Fe₂O₃.

Основная реакция кислотного разложения описывается уравнением: $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 6\text{HCl} \rightarrow 2\text{FeCl}_3 + 3\text{H}_2\text{O}$.

Критериями выбора рационального режима были: минимальное остаточное содержание Fe₂O₃ в твердой фазе, получение концентрированного и технологически пригодного раствора FeCl₃, а также исключение избыточного расхода кислоты, вызывающего разбавление продукта. Математическая оптимизация и стоимостная оценка в работе не проводились.

В исходном экспериментальном массиве отсутствовали сведения о числе параллельных повторов и доверительных интервалах. Поэтому результаты представлены как фактические значения для соответствующих режимов без расчета статистической значимости. Это ограничение учитывается при интерпретации выводов: выбранный режим рассматривается как рациональный только в пределах изученных условий.

Испытания полученного раствора на реальных промышленных сточных водах, определение эффективности удаления мутности, цветности, нефтепродуктов и других загрязнителей, а также оценка стабильности при хранении, содержания вредных примесей и экономической эффективности не входили в объем данной работы.



Рисунок 1. Схема получения раствора хлорида железа (III)

Результаты и обсуждение

Результаты химического анализа представлены в таблице 1. Основными компонентами пробы являлись SiO_2 (38,2 %) и Fe_2O_3 (30,0 %). Высокая доля Fe_2O_3 подтверждает возможность рассматривать сырье как источник железа, тогда как значительное содержание кварцевой составляющей предполагает образование кремнеземистого нерастворимого остатка при солянокислом выщелачивании.

Таблица 1.

Химический состав железосодержащей руды и методы определения

Компонент	Массовая доля, %	Метод определения
Al_2O_3	0,8	фотометрический
SiO_2	38,2	гравиметрический
MgO	0,13	комплексометрический
CaO	0,50	комплексометрический
V_2O_5	0,01	фотометрический
MnO	0,25	фотометрический
Fe_2O_3	30,0	титриметрический по ISO 2597-2: 2019

Низкое содержание Al_2O_3 , MgO , CaO , MnO и V_2O_5 не исключает их перехода в раствор, поэтому для оценки пригодности продукта в водоочистке в дальнейшем требуется определить фактическое содержание этих примесей в готовом коагулянте.

Наиболее интенсивное растворение железосодержащей фазы наблюдалось в первые 30 – 60 мин. При дальнейшем увеличении продолжительности обработки прирост концентрации FeCl_3 уменьшался, что соответствует снижению доступной реакционноспособной поверхности и накоплению продуктов реакции в жидкой фазе [8].

Сводные количественные показатели, имеющиеся в исходном экспериментальном массиве, приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Показатели кислотного разложения при выбранных режимах

Руда : HCl	Время, мин	FeCl_3 в растворе, %	Fe_2O_3 в остатке, %	Вязкость, мПа·с
1:1	30–120	38,4–39,0	20,5	-
1:2	120	32,0	0,41	2,6
1:3	120	числовое значение не приведено	числовое значение не приведено	-

При соотношении 1:1 высокая концентрация FeCl_3 в жидкой фазе сочеталась с остаточным содержанием 20,5 % Fe_2O_3 в твердом продукте. Следовательно, высокая концентрация раствора сама по себе не является достаточным критерием полноты извлечения железа.

Увеличение расхода HCl до соотношения 1:2 снизило остаточное содержание Fe_2O_3 до 0,41 %. Полученный раствор содержал 32,0 % FeCl_3 и имел вязкость 2,6 мПа·с, что облегчает его перемешивание, перекачивание и дозирование. При соотношении 1:3 полного количественного набора данных в исходном протоколе не приведено; качественно отмечено снижение концентрации FeCl_3 вследствие разбавления.

Таким образом, режим «руда : HCl» 1:2 и продолжительность 120 мин выбран как рациональный по совокупности двух доступных критериев: почти полное растворение Fe_2O_3 и отсутствие избыточного разбавления. Термин «оптимальный» не используется, поскольку не исследованы другие концентрации HCl, температура, более узкие классы крупности, статистическая воспроизводимость и экономический критерий.

Полученные данные подтверждают принципиальную возможность переработки местной железосодержащей руды с получением раствора FeCl_3 . Однако наличие целевого соединения в растворе не доказывает эффективность очистки воды. Для обоснования применения продукта в качестве коагулянта необходимо провести jar-тесты на модельных и реальных сточных водах с определением мутности, цветности, содержания взвешенных веществ, остаточного железа и других нормируемых показателей по стандартным методикам [10, 7, 5].

Также необходимы сравнение с промышленным FeCl_3 при одинаковых дозах, исследование влияния pH и температуры, определение оптимальной дозировки, оценка состава примесей, коррозионной активности, стабильности раствора при хранении и образование осадка. Экономическая оценка должна учитывать стоимость добычи и подготовки руды, расход кислоты, энергию, фильтрацию, утилизацию кремнеземистого остатка и транспортирование продукта.

Заключение

1. Железосодержащая руда Сарибатырского месторождения содержит 30,0 % Fe_2O_3 и 38,2 % SiO_2 и может рассматриваться как потенциальное сырье для получения раствора хлорида железа (III).

2. При использовании 30 %-ного раствора HCl и соотношения «руда: HCl » 1:1 в твердом остатке сохраняется 20,5 % Fe_2O_3 , что свидетельствует о недостатке реагента.

3. При соотношении 1:2 и продолжительности 120 мин остаточное содержание Fe_2O_3 снижается до 0,41 %, раствор содержит 32,0 % FeCl_3 и имеет вязкость 2,6 мПа·с.

4. Соотношение 1:2 и продолжительность 120 мин являются рациональными только в пределах изученных условий. Доказательство глобальной оптимальности требует варьирования концентрации кислоты, температуры и крупности частиц, повторных опытов и статистической обработки.

5. Эффективность очистки реальных промышленных сточных вод, сравнение с промышленными аналогами, стабильность продукта, содержание вредных примесей и экономические показатели в данной работе не установлены и должны быть предметом дальнейших исследований.

Список литературы

1. Министерство горнодобывающей промышленности и геологии Республики Узбекистан. АО «Узбекгеологоразведка»: продолжаются работы по оцифровке геологических данных. 07.02 [Электронный ресурс]. – 2025. URL: <https://gov.uz/ru/mingeo/news/view/35419> (дата обращения: 27.07.2026).
2. Dhrubo A.A.K., Jannat M., Hossain M.S. Enhancing the performance of coagulants for wastewater treatment by varying and optimizing the experimental parameters // Journal of Water Process Engineering. – 2023. – Т. 56.
3. Gunarathne V., Rajapaksha A.U., Vithanage M. et al. Hydrometallurgical processes for heavy metals recovery from industrial sludges // Critical Reviews in Environmental Science and Technology. – 2022. – Т. 52, № 6.
4. ISO 2597–2:2019. Iron ores – Determination of total iron content. Part 2: Titrimetric methods after titanium(III) chloride reduction / International Organization for Standardization. – Geneva: ISO, 2019. – 20 P.
5. Li, F. Water Treatment Chemicals: Coagulants and Flocculants / F. Li. – Singapore: Springer, 2025.
6. Linnikov, O.D. Coagulation removal of nickel (II) ions by ferric chloride: efficiency and mechanism / O.D. Linnikov, I.V. Rodina, G.S. Zakharova [et al.] // Water Environment Research. – 2022. – Т. 94, № 12. – P. 2345–2356.
7. Lucas, M.S. Industrial wastewater treatment by coagulation-flocculation and advanced oxidation processes: a review / M.S. Lucas, A.R. Teixeira, N. Jorge, J.A. Peres // Water. – 1958. – Т. 17, № 13. – P. 1934–1958.

8. Maltrana V., Morales J. The use of acid leaching to recover metals from tailings: a review // *Metals*. – 2023. – Т. 13, № 11.
9. Purkait, M.K. *Electrocoagulation Based Treatment of Water and Wastewater: Overview and Applications* / M.K. Purkait, P.P. Das, M. Sharma. – Elsevier. – 2024. – 800 P.
10. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. – 24-е изд. – Washington, DC: APHA, AWWA, WEF, 2023. – 1536 с.

References

1. [JSC 'Uzbekgeologorazvedka': Work Continues on Digitization of Geological Data. 07.02] – 2025. (data obrashcheniya: 27.07.2026) – 2026. – URL: <https://gov.uz/ru/mingeo/news/view/35419> (дата обращения: 20.08.2026). (In Russ.)
2. Dhrubo A.A.K., Jannat M., Hossain M.S. Enhancing the performance of coagulants for wastewater treatment by varying and optimizing the experimental parameters // *Journal of Water Process Engineering*. – 2023. – Т. 56.
3. Gunarathne V., Rajapaksha A.U., Vithanage M. et al. Hydrometallurgical processes for heavy metals recovery from industrial sludges // *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. – 2022. – Т. 52, № 6.
4. ISO 2597–2:2019. Iron ores – Determination of total iron content – Part 2: Titrimetric methods after titanium(III) chloride reduction. – Geneva: International Organization for Standardization, 2019.
5. Li F. *Water Treatment Chemicals: Coagulants and Flocculants*. – Singapore: Springer, 2025.
6. Linnikov O.D., Rodina I.V., Zakharova G.S. et al. Coagulation removal of nickel (II) ions by ferric chloride: efficiency and mechanism // *Water Environment Research*. – 2022. – Т. 94, № 12.
7. Lucas M.S., Teixeira A.R., Jorge N., Peres J.A. Industrial wastewater treatment by coagulation-flocculation and advanced oxidation processes: a review // *Water*. – 1934. – Т. 17, № 13.
8. Maltrana V., Morales J. The use of acid leaching to recover metals from tailings: a review // *Metals*. – 2023. – Т. 13, № 11.
9. Purkait M.K., Das P.P., Sharma M. *Electrocoagulation Based Treatment of Water and Wastewater: Overview and Applications*. Elsevier. – 2024.
10. APHA, AWWA, WEF. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 24th ed. Washington, DC. – Washington, DC: APHA, AWWA, WEF. – 2023.

Статья поступила в редакцию: 13.07.2026

Статья принята к публикации: 24.07.2026

Статья опубликована: 28.08.2026

УДК 661.52+631.8

DOI: 10.32743/UniTech.2026.149.8.23298

Получение сложных удобрений из низкосортных фосфоритов с использованием фосфогипса и глауконита

Джумабаев Расулбек Фарход угли

базовый докторант

Каракалпакский государственный университет имени Бердаха

Республика Узбекистан, Нукус

E-mail: jumabaev_r@karsu.uz

Реймов Ахмед Мамбеткаримович

д-р техн. наук, проф.

акад., Академия Наук Республики Узбекистан, Каракалпакское Отделение

Республика Узбекистан, г. Нукус

Курбаниязов Рашид Калбаевич

д-р. техн. наук, доц., Каракалпакский государственный университет

Республика Узбекистан, г. Нукус

Кыстаубаева Молдир Артыкбаевна

базовый докторант

Каракалпакский государственный университет имени Бердаха

Республика Узбекистан, Нукус

Ережепова Бибинур Курбаназар кизи

магистрант

Каракалпакский государственный университет

Республика Узбекистан, г. Нукус

Production of complex fertilizers from low-grade phosphorites using phosphogypsum and glauconite

Jumaboyev Rasulbek

Basic doctoral student

Karakalpak State University named after Berdakh

Republic of Uzbekistan, Nukus

Reymov Akhmed

doctor of Technical Sciences

Prof., Academician, Karakalpak Branch of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan

Republic of Uzbekistan, Nukus

Kurbaniyazov Rashid

doctor of Technical Sciences, Associate Professor

Karakalpak State University

Republic of Uzbekistan, Nukus

Kistaubaeva Moldir

Basic doctoral student

Karakalpak State University named after Berdakh

Republic of Uzbekistan, Nukus

Erejepova Bibinyr

master's student

Karakalpak State University

Republic of Uzbekistan, Nukus

Аннотация

Основной целью исследования является перевод низкосортных фосфоритов Центральных Кызылкумов в усвояемую форму с низкой нормой экстракционной фосфорной кислоты (ЭФК), утилизация промышленных отходов фосфогипса и одновременное использование его в виде мелиоранта для засоленных земель, обогащение состава сложного удобрения на основе глауконитовых песков микроэлементами, а также снижение расхода аммиака, используемого при традиционном методе нейтрализации, путём добавления фосфогипса и глауконита в кислотную среду, образуемую ЭФК. Содержание P_2O_5 в составе сложного удобрения определяли спектрофотометрическим методом, содержание CaO — потенциометрическим титрованием, pH — ионометром, а прочность гранул — приборе для измерения прочности гранул. Глауконит способствует реакции нейтрализации кислой среды сложных удобрений, фосфогипс способствует относительной нейтрализации удобрений в кислой среде, что приводит к снижению расхода аммиака. В составе сложных удобрений, полученных из принятой оптимальной нормы ЭФК, содержатся в достаточном количестве усвояемые растениями формы P_2O_5 и CaO . Механическая прочность гранул сложных удобрений полностью соответствует требованиям ГОСТ, установленным для фосфорных удобрений. В целом, такая технология производства позволяет эффективно использовать низкосортные фосфориты и промышленные отходы, получать гранулированные сложные удобрения, отвечающие требованиям ГОСТа, со снижением нормы ЭФК и расхода аммиака.

Библиографическое описание: Получение сложных удобрений из низкосортных фосфоритов с использованием фосфогипса и глауконита // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Джумабаев Р.Ф.У. [и др.]. 2026. 8(149). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23298>

Abstract

The main objective of this study is to convert low-grade phosphorites from the Central Kyzylkum deposit into a plant-available form using a reduced dosage of extraction phosphoric acid (EPA), to utilize phosphogypsum industrial waste while simultaneously employing it as a soil amendment for saline soils, to enrich the composition of complex fertilizers based on glauconite sands with micronutrients, and to reduce the consumption of ammonia used in the conventional neutralization process by introducing phosphogypsum and glauconite into the acidic medium generated by EPA. The P_2O_5 content in the complex fertilizer was determined by the spectrophotometric method, the CaO content by potentiometric titration, the pH using an ionometer, and the mechanical strength of the granules using a granule strength testing instrument. Glauconite promotes the neutralization reaction of the acidic medium of complex fertilizers, while phosphogypsum contributes to the partial neutralization of fertilizers in the acidic medium, thereby reducing ammonia consumption. The complex fertilizers produced using the adopted optimum dosage of EPA contain sufficient amounts of plant-available forms of P_2O_5 and CaO. The mechanical strength of the complex fertilizer granules fully complies with the requirements of the GOST standard established for phosphate fertilizers. Overall, this production technology enables the efficient utilization of low-grade phosphorites and industrial waste, making it possible to produce granular complex fertilizers that comply with GOST requirements while reducing both the dosage of EPA and ammonia consumption.

Ключевые слова: сложное удобрение, низкосортный фосфорит, экстракция фосфорной кислоты, фосфогипс, глауконит, активация, нейтрализация.

Keywords: complex fertilizer, low-grade phosphorite, phosphoric acid extraction, phosphogypsum, glauconite, activation, neutralization.

Введение

По мнению учёных, важным условием обеспечения производства достаточных, безопасных и питательных продуктов питания для удовлетворения потребностей населения мира, которое, по прогнозам, достигнет 10 миллиардов к 2050 году, является постоянная модернизация сельскохозяйственного сектора [8,5]. В исследованиях отмечается, что хотя эти цифры ещё больше выросли в результате пандемии COVID-19, мировое сообщество ещё до пандемии сбилось с пути достижения цели по снижению голода до нуля к 2030 году. Из-за изменения потребления и предпочтений в отношении продуктов питания, для удовлетворения растущего спроса на продукты питания к 2050 году необходимо увеличить объём промышленности по производству продуктов питания примерно на 50 процентов [3]. Фосфатные породы по-прежнему являются основным источником фосфора для удобрений, но это ограниченный ресурс, который не будет сохраняться вечно. Основным местным источником фосфора в Узбекистане является фосфорит Центральных Кызылкумов. Однако этот фосфорит в основном состоит из низкокачественных руд с высоким содержанием солей кальция и минералов, похожих на апатит. Когда эти фосфориты используются непосредственно в почве, они работают не очень хорошо, так как фосфор удерживается в формах, которые растениям трудно использовать, и выделяется только медленно. Это

означает, что фосфор легко недоступен для растений, что может ограничить их рост и развитие. В результате фермерам может потребоваться использовать больше этих фосфоритов для достижения того же эффекта, что может быть неэффективным и дорогостоящим [6,10]. Чтобы фосфор был пригоден для использования растениями, сырьё обычно обрабатывают кислотой. Сильные кислоты могут разлагать карбонатный материал, но они также повреждают фосфатные части и расходуют много кислоты, что увеличивает затраты и снижает количество полезного фосфора. Таким образом, при работе с низкосортными рудами лучше использовать меньше кислоты, но при этом убедиться, что большая часть фосфора пригодна для использования в конечном продукте. Такой подход технически и экономически обоснован [7].

Производство фосфорной кислоты с использованием влажного процесса создаёт большую проблему — это приводит к образованию большого количества фосфогипса в качестве побочного продукта. Этот фосфогипс занимает много места для хранения, наносит вред окружающей среде и увеличивает стоимость производства фосфорной кислоты. Таким образом, поиск полезных и ценных способов использования фосфогипса является ключевой целью современной циркулярной экономики [4,11]. С другой стороны, фосфогипс богат кальцием, что делает его отличным материалом для улучшения качества почвы, особенно для солёных почв, распространённых во многих районах [1].

Глауконит — ещё один очень полезный ресурс. Это тип слоистого силиката, богатый калием и железом, и имеет особую структуру, которая помогает медленно выделять питательные вещества, делая их более доступными для растений. Было доказано, что при активации глауконит улучшает плодородие почвы, что очень важно для роста растений. Это связано с тем, что он может обмениваться ионами и помогать растениям усваивать необходимые им питательные вещества, что делает его отличным естественным способом повышения качества почвы [2,9].

В научной литературе предложен ряд принципиальных технологических схем кислотной активации низкосортных фосфоритов. В качестве примера переработки фосфатного сырья методом кислотной активации приведены технологии с использованием серной (H_2SO_4), азотной (HNO_3), соляной (HCl) и экстракционной фосфорной кислоты (H_3PO_4). Среди основных технологий активация серной и азотной кислотами является наиболее эффективной для высокосортных фосфоритов, однако имеет ряд недостатков, связанных с образованием в процессе реакции определённого количества сульфата кальция (гипса).

При использовании экстракционной фосфорной кислоты (ЭФК) в реакционную систему не вводятся посторонние компоненты, а наличие фосфора непосредственно в составе кислоты обеспечивает более высокое содержание P_2O_5 по сравнению с активацией другими минеральными кислотами. Кроме того, в большинстве литературных источников фосфорит, фосфогипс и глауконит изучались отдельно, тогда как их совместная переработка в рамках единой технологической схемы исследована недостаточно.

При активации высококонцентрированными кислотами происходит растворение не только реакционноспособной части, но и минералов фосфорита, что может привести к потерям P_2O_5 . В связи с этим для переработки низкосортных фосфоритов целесообразно

использовать кислоты в пониженных нормах. Исходя из вышеизложенного, в настоящей работе в качестве основы была принята технологическая схема, предусматривающая активацию низкосортного фосфорита пониженной нормой экстракционной фосфорной кислоты с последующим введением фосфогипса и глауконита.

Целью данной статьи является получение особого вида сложного удобрения, объединяющего эти три компонента с меньшим использованием кислоты и аммиака, и налаживание использования промышленных отходов.

Объекты и методы исследования

Фосфатные породы Центральных Кызылкумов были основным источником фосфора. Он состоит в среднем из 21 % P_2O_5 , 46 % CaO , 1,24 % Al_2O_3 , 1,05 % Fe_2O_3 , 1,75 % MgO , 2 % F и 11,42 % CO_2 . Состав фосфогипса, являющегося побочным продуктом производства фосфорной кислоты на АО «Аммофос-Максам», был иным: 1,15 % общего P_2O_5 , 0,12 % водорастворимого P_2O_5 , 12,38 % H_2O , 51,17 % SO_3 и 36,84 % CaO . Кроме того, использовался глауконит месторождения Крантау, являющийся разновидностью алюмосиликата калия-железа. Комбинация этих трёх компонентов совместно перерабатывалась для получения сложных удобрений.

Эксперимент проводили в лабораторных условиях в три этапа: подготовка сырья, кислотная активация фосфорита и анализ полученного продукта. После доставки фосфорита с месторождения его высушивали на открытом воздухе при комнатной температуре с целью удаления поверхностной влаги. Высушенные образцы измельчали в лабораторной щековой дробилке (Retsch BB 250) до размера частиц менее 5 мм. Затем материал подвергали дополнительному измельчению в шаровой мельнице (Retsch PM 200) до получения однородного порошка. Полученный порошок просеивали с использованием лабораторного анализатора сит (Retsch AS 200 control B) для получения фракции с заданным размером частиц. Перед кислотной активацией образцы высушивали в сушильном шкафу с принудительной циркуляцией воздуха (FAITHFUL Drying Oven 101-1AB) при температуре 80 °C в течение 2–3 часов. После сушки образцы охлаждали в эксикаторе до комнатной температуры для предотвращения повторного поглощения влаги, после чего направляли на стадию кислотной активации. На следующем этапе рассчитанные количества фосфорита и кислоты взвешивали на аналитических весах (HERMES ZEC 21) и помещали в термостатируемый стеклянный контейнер.

Эта кислота содержит 16–16,5 % P_2O_5 , которую добавляют в фосфоритную муку в количестве 5–50 % от обычной потребности. Кислоту постепенно вливают в фосфоритную муку, расположенную под вытяжным шкафом, потому что в результате реакции выделяются углекислый газ и фтористый водород, а температура может повыситься до 80–90 градусов. Весь процесс занимает около 30 минут. Затем в смесь добавляют немного глауконита и фосфогипса и тщательно перемешивают. После этого, если полученная смесь очень кислая, её нейтрализуют жидким аммиаком. Наконец, смесь измельчают в мелкие гранулы с помощью дискового гранулятора и водяного распылителя, а затем сушат в сушилке при температуре 80 градусов до достижения постоянного веса.

Содержание P_2O_5 определяли спектрофотометрическим методом (UV-5100 UV-VIS, согласно EN 15959), а CaO — потенциометрическим титрованием (автоматический титратор HI901, Hanna Instruments). В 10 %-ной водной суспензии pH измеряли на ионометре ПХСЖ-216Ф, а прочность гранул на дробление — на приборе УНКС-3А.

Согласно требованиям ГОСТ 21560.2 – 82, гигроскопические свойства фосфоритовой муки и гранулированных сложных удобрений размером 2 – 3 мм определяли эксикаторным методом при температуре 25°C.

Каждый эксперимент проводили в трёх повторностях ($n = 3$), а полученные результаты представляли в виде среднего значения $\pm$ стандартного отклонения ($\text{mean} \pm \text{SD}$). Статистическую оценку влияния нормы кислоты на показатели удобрения (содержание усвояемых форм P_2O_5 и CaO, значение pH и механическую прочность гранул) проводили с использованием однофакторного дисперсионного анализа (one-way ANOVA). Различия считали статистически значимыми при $p < 0,05$. Полосы погрешностей (error bars), представленные на рисунках, соответствуют стандартному отклонению ($\pm \text{SD}$), рассчитанному по результатам трёх параллельных измерений.

Результаты и обсуждение

Экспериментальные результаты представлены в таблице 1. Как видно из таблицы 1, с увеличением нормы экстракционной фосфорной кислоты (ЭФК) и добавлением минерала глауконита общее содержание P_2O_5 в полученных продуктах значительно возрастает, тогда как общее содержание CaO существенно снижается. Это явление объясняется тем, что экстракционная фосфорная кислота (ЭФК) содержит 16–16,5 % P_2O_5 . При активации фосфорита с использованием 5 %-ной нормы экстракционной фосфорной кислоты (ЭФК) и последующем добавлении фосфогипса и глауконита с увеличением их доли наблюдается снижение общего содержания P_2O_5 с 13,54 % до 8,5 %. При этом общее содержание CaO также уменьшается с 33,91 % до 24,17 %. Аналогичные изменения наблюдались при использовании экстракционной фосфорной кислоты (ЭФК) в нормах 10, 20, 30 и 50 %.

Таблица 1.

Химические составы сложных удобрений на основе Кызылкумского фосфорита, фосфогипса и глауконита

№	Сотношения ком- понентов	Расход Н ₂ O От- нос. от общ. Мас. сис. %	Содержания компанентов %						рН 10% ный сусп.	Проч. гра- нул, МПа	Гигр. точ, %
	ФМ : ЭФК : ФГ : Г		P ₂ O ₅ общ	P ₂ O ₅ общ	P ₂ O ₅ усв	CaO усв	P ₂ O ₅ вод	CaO вод			
5% нормы экстракции фосфорной кислоты (норма применения ЭФК)											
1	2,5 : 1 : 1,3 : 0	0,72	13,54	33,91	5,9	16,03	1,30	8,97	6,85	2,31	76,61
2	2,5 : 1 : 2,5 : 0	1	12,39	37,74	5,5	18,16	1,31	10,25	6,79	1,66	79,48
3	2,5 : 1 : 1,3 : 1,3	1,2	12,32	28,66	5,56	14,2	1,37	8,01	6,86	1,94	74,85
4	2,5 : 1 : 2,5 : 2,5	1,45	8,504	24,17	4,03	12,4	1,14	7,12	6,83	1,73	72,41
10% нормы экстракции фосфорной кислоты (норма применения ЭФК)											
5	1,3 : 1 : 0,6 : 0	0,2	18,98	32,66	9,46	16,94	2,87	10,09	6,01	2,68	75,23
6	1,3 : 1 : 1,3 : 0	0,3	14,63	34,75	7,45	18,34	2,30	11,09	6,1	2,14	78,08

№	Сотношения ком- понентов	Расход H ₂ O От- нос. от общ. Мас. сис. %	Содержания компонентов %						рН 10% ный сусп.	Проч. гра- нул, МПа	Гигр. точ, %
	ФМ : ЭФК : ФГ : Г		P ₂ O ₅ общ	P ₂ O ₅ общ	P ₂ O ₅ усв	CaO усв	P ₂ O ₅ вод	CaO вод			
7	1,3 : 1 : 0,6 : 0,6	0,2	14,66	27,45	7,57	14,79	2,36	9,07	6,14	2,27	73,45
8	1,3 : 1 : 1,3 : 1,3	0,33	10,91	23,22	5,86	12,81	1,89	8,12	6,17	1,96	71,01
20% нормы экстракции фосфорной кислоты (норма применения ЭФК)											
9	0,6 : 1 : 0,3 : 0	-	22,31	31,13	12,65	18,41	4,27	11,34	3,96	3,14	69,71
10	0,6 : 1 : 0,6 : 0	-	17,98	31,65	10,36	19,01	3,60	11,96	4,21	2,7	72,55
11	0,6 : 1 : 0,3 : 0,3	-	18,16	25,91	10,6	15,69	3,74	10,01	4,27	2,61	67,92
12	0,6 : 1 : 0,6 : 0,6	-	13,28	22,57	8	14,01	2,93	9,18	4,25	2,46	65,50
30% нормы экстракции фосфорной кислоты (норма применения ЭФК)											
13	0,4 : 1 : 0,2 : 0	-	23,55	26,39	14,96	18,7	5,68	11,4	2,6	2,8	63,75
14	0,4 : 1 : 0,4 : 0	-	18,99	28,31	12,2	20,36	4,73	12,49	3,19	3,6	66,62
15	0,4 : 1 : 0,2 : 0,2	-	19,81	22,82	12,9	16,55	5,06	10,2	3,2	4,1	62,01
16	0,4 : 1 : 0,4 : 0,4	-	16,41	21,16	11,28	15,69	4,45	9,98	3,38	4,5	59,55
50% нормы экстракции фосфорной кислоты (норма применения ЭФК)											
17	0,3 : 1 : 0,1 : 0	-	28,16	23,61	20,8	18,5	8,40	11,88	2,58	5,1	59,37
18	0,3 : 1 : 0,3 : 0	-	23,03	23,82	17,22	18,85	7,13	12,2	2,61	5,68	62,23
19	0,3 : 1 : 0,1 : 0,1	-	23,19	19,46	17,6	15,63	7,40	10,13	2,64	5,91	57,60
20	0,3 : 1 : 0,3 : 0,3	-	18,81	19,01	14,8	15,7	6,37	10,3	2,76	4,75	55,16

При производстве фосфорных удобрений одним из основных показателей качества является содержание усвояемых растениями и водорастворимых форм фосфора и кальция. Поэтому в настоящем исследовании были определены усвояемые растениями и водорастворимые формы фосфора и кальция. Полученные результаты представлены на рисунке 1.

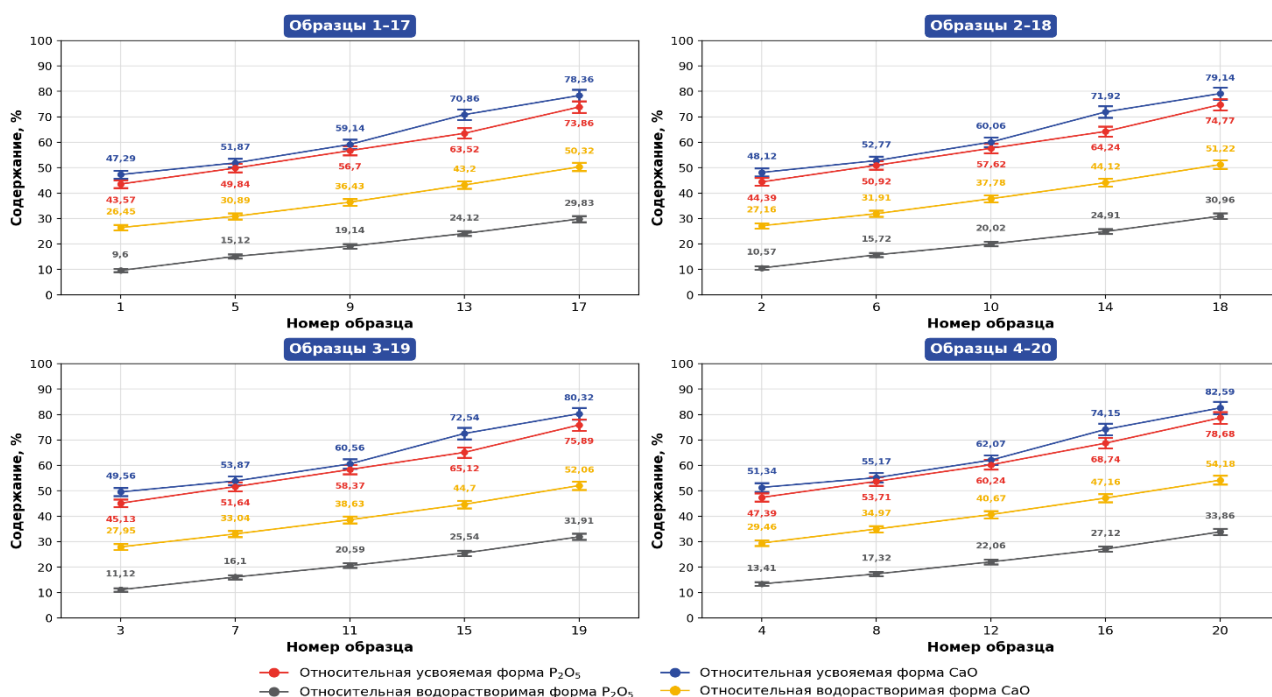


Рисунок 1. Изменение относительного содержания усвояемых и водорастворимых форм фосфора и кальция в зависимости от нормы ЭФК

Как показано на рисунке 1, полученные удобрения содержат определённое количество водорастворимого фосфора. В частности, при активации фосфорита с использованием 5 %-ной нормы экстракционной фосфорной кислоты (ЭФК) содержание водорастворимого P_2O_5 в удобрениях составляет 9,60–13,41 %, тогда как содержание CaO находится в пределах 26,45–29,46 %. При увеличении нормы ЭФК до 50 % эти показатели значительно возрастают, достигая 29,83–33,86 % для P_2O_5 и 50,32–54,18 % для CaO. Полученные результаты свидетельствуют об образовании определённого количества монокальцийфосфата в процессе активации.

При увеличении нормы ЭФК с 5 до 50 % относительное содержание усвояемого растениями фосфора возрастает с 43,57 % до 78,68 %. Одновременно относительное содержание усвояемого CaO увеличивается с 47,29 % до 82,59 %.

Различия между нормами по активационному дисперсионному анализу при норме кислоты от 5 % до 50 % были статистически значимыми ($p < 0,05$). Повышение доли добавляемого фосфогипса приводит к заметному увеличению доли усвояемых форм фосфора. Это можно объяснить наличием в составе фосфогипса остаточной фосфорной кислоты и связанных с ней примесей.

Исследования условий хранения продукции показывают, что образец (12-образец), выбранный как оптимальный, может храниться в стандартных обычных мешках при относительной влажности воздуха ниже 65,5 %.

Глауконит и фосфогипс обладают нейтрализующим действием. При высоком содержании кислоты, таком как 30 или 50 %, смесь становится очень кислой. Если обработка не проводится, для её балансировки потребуется много аммиака, что также может повредить оборудование. Начальная точка каждого компонента различна: pH 10 %-ной фосфоритовой смеси около 11, глауконита около 9, фосфогипса 4,91 и экстракционная кислота очень низкая, от 1,5 до 2. Поскольку глауконит и фосфогипс близки к нейтральным или слегка щелочны,

они помогают сбалансировать кислотность при добавлении в смесь. Они выполняют функцию мягкого буфера, снижая кислотность смеси. Это важно, так как высокая кислотность может вызвать такие проблемы, как повреждение оборудования. Добавление глауконита и фосфогипса снижает кислотность и делает работу со смесью более безопасной.

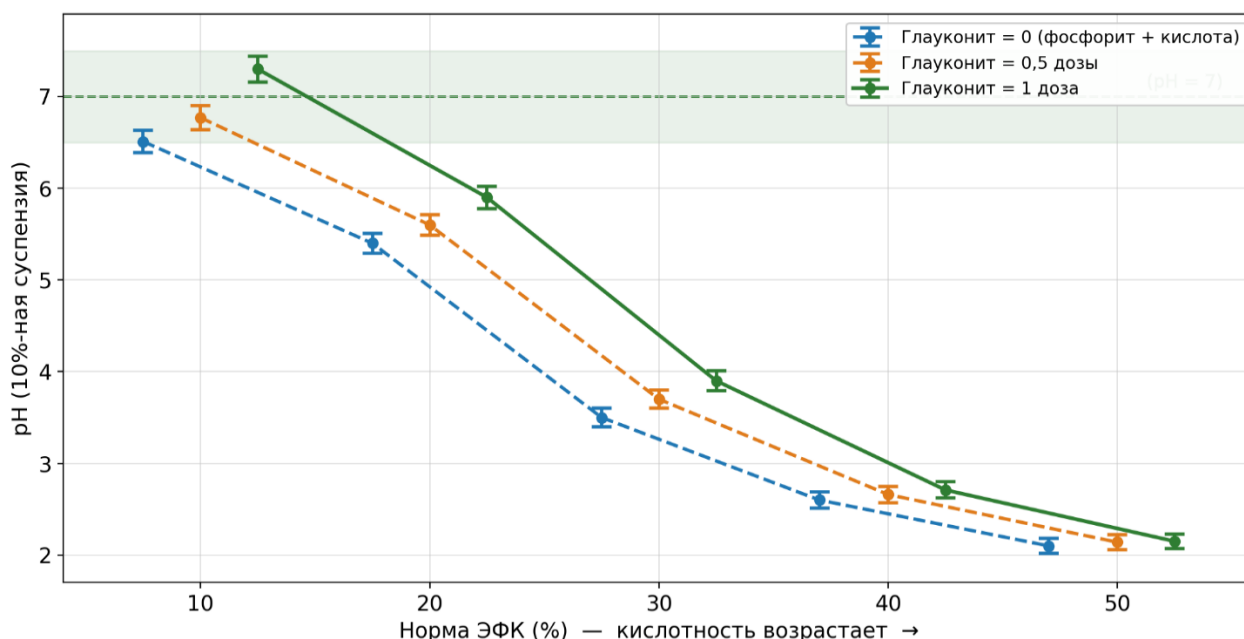


Рисунок 2. Изменение показателя pH удобрения путём добавления глауконита Крантау к продуктам переработки фосфорита Центральных Кызылкумов с неполной нормой ЭФК (планки погрешностей — $\pm SD$, $n = 3$)

Из рисунка 2 видно, что при добавлении большего количества глауконита смесь становится менее кислой и приближается к нейтральному состоянию. Например, смесь фосфорита и глауконита в соотношении 1: 0,5 имеет значительно меньшую кислотность. При соотношении 1: 1 этот эффект становится ещё более заметным. Аналогичное действие оказывает и фосфогипс. К сведению, для нейтрализации смеси требуется меньше аммиака, что является большим преимуществом. Чем больше используется глауконита и фосфогипса, тем меньше аммиака требуется. Это не только экономит средства на реагенты, но и снижает износ оборудования. В то же время мы используем два промышленных побочных продукта, которые должны храниться в другом месте, что является отличным способом переработки и сокращения отходов.

Качество удобрения во многом зависит от того, насколько хорошо устойчивы его зёрна. Для фосфорных удобрений очень важна механическая прочность гранул. При увеличении нормы ЭФК с 5 до 50 % прочность гранул при измельчении увеличилась с 1,66 до 8,1 МПа. Это значительно выше нормы 2 МПа, установленной для фосфорных удобрений, то есть удобрение может выдерживать транспортировку и хранение без разложения. Гранулированное удобрение представляет собой однородный, свободно текучий материал, который очень удобно вносить в почву перед осенней вспашкой. Он также содержит фосфогипс, что помогает улучшить состояние засоленных почв.

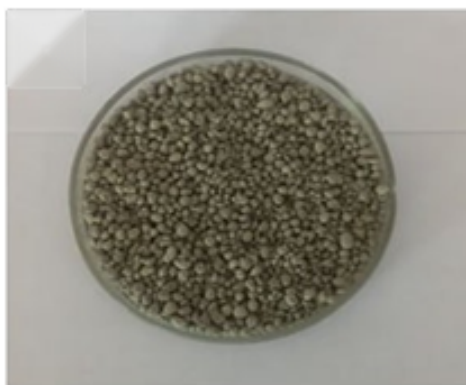


Рисунок 3. Внешний вид полученного гранулированного сложного смешанного удобрения

По результатам этих экспериментов была составлена основная технологическая схема переработки низкосортного фосфорита Центральных Кызылкумов. В этой схеме низкосортный фосфорит активируют ЭФК в малых дозах, затем смешивают с фосфогипсом и глауконитом Крантау (рис. 4).

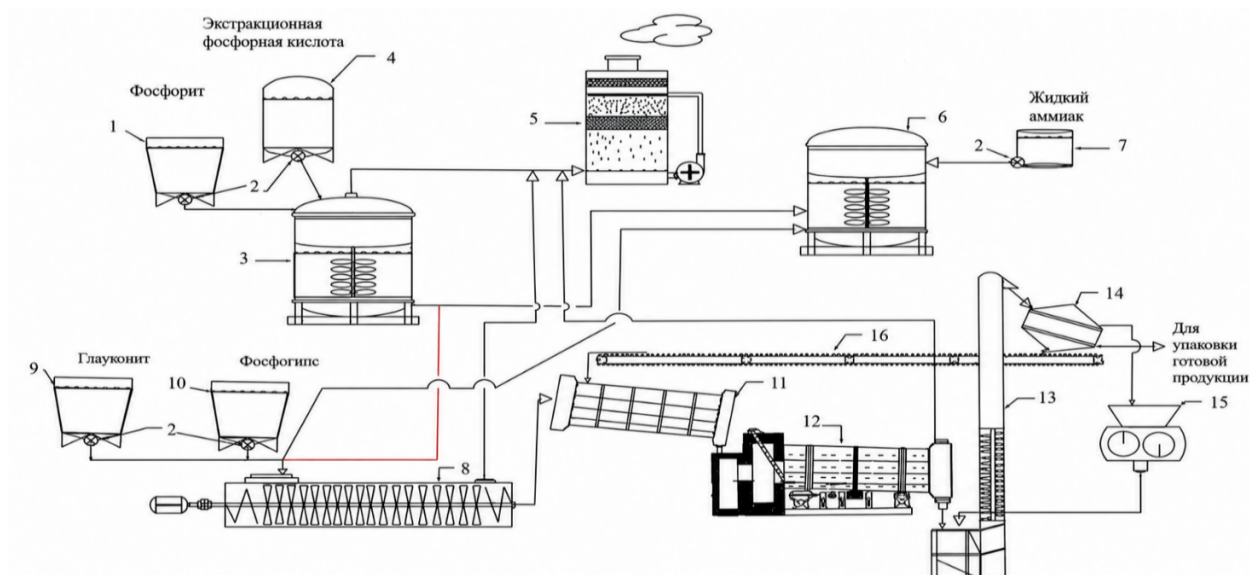


Рисунок 4. Основная технологическая схема получения сложных удобрений путём переработки низкосортных фосфоритов Центральных Кызылкумов экстракционной фосфорной кислотой с добавлением фосфогипса и глауконита

Схема состоит из следующих устройств: 1 — бункер фосфорита; 2 — дозатор; 3, 6 — реактор-экстрактор / реактор-нейтрализатор; 4 — ёмкость ЭФК; 5 — абсорбционная колонна; 7 — бункер жидкого аммиака; 8 — шнековый смеситель; 9 — бункер глауконита; 10 — бункер фосфогипса; 11 — гранулятор; 12 — сушилка; 13 — элеватор; 14 — двухэкранный инверсионный классификатор; 15 — дробилка; 16 — ленточный конвейер.

Первый этап — кислотная активация. Для начала этого процесса измельчённый фосфорит из ёмкости 1 взвешивается в установке 2 и выводится в специальный реактор-экстрактор 3. Одновременно из ёмкости 4 через дозатор 2 добавляется фосфорная кислота. Эта химическая реакция длится около 30 минут и выделяет много тепла, что делает смесь очень кислой и подверженной коррозии. Для предотвращения повреждений реактор обычно

покрывают специальными легированными сталями. Выделяющиеся в этом процессе газы, такие как углекислый газ и фтористые соединения, поглощаются в специальных абсорберах 5, чтобы они не выделялись в воздух. Это важный шаг к охране окружающей среды.

Процесс переходит к следующему этапу — нейтрализации. Переход реакционной смеси к нейтрализатору 6 зависит от того, насколько она кислая. Если смесь очень кислая, её направляют в нейтрализующий реактор 6, а жидкий аммиак из аммиачного бункера 7 через дозатор 2 — в реактор 6. Это происходит при очень быстром перемешивании смеси, так как при встрече аммиака с кислотной смесью он сразу начинает образовывать твёрдое вещество. Однако, если смесь не очень кислая, т.е. pH от 3,5 до 4, она пропускает этап нейтрализации и переходит непосредственно в смеситель, т.е. не нейтрализуется. Для этого есть две хорошие причины: во-первых, слишком кислые удобрения не хороши для солончаковой почвы в этом районе, а во-вторых, они могут быстрее разрушить оборудование. Аммиак, используемый на этом этапе, находится в жидкой, а не газообразной форме, так как его легче транспортировать и хранить, а также его можно добавлять в нейтрализатор без введения воздуха.

На третьем этапе все продукты смешиваются с дополнительными ингредиентами. Нейтрализованная или непосредственно пропущенная смесь поступает в смеситель 8. При этом Крантауский глауконит добавляется из бункера 9 и фосфогипс из бункера 10, каждый со своим специальным дозатором 2. Если в процессе перемешивания выделяются какие-либо газы, они перед удалением вновь улавливаются в абсорбционной колонне 5.

На четвёртом этапе процесс протекает следующим образом. Здесь смесь гранулируется, высушивается, а затем сортируется по размеру. Гранулятор 11 разделяет смесь на мелкие кусочки, которые затем сушат в специальной сушилке 12. После этого конвейерная лента 13 подаёт их на классификатор 14, который сортирует по размеру. Именно нужные размеры — от 1 мм до 4 мм — отправляются на упаковку и хранение. Но очень крупные — более 5 мм — направляют на измельчение в измельчитель 15, а затем снова в классификатор 14. Мелкие, порошкообразные кусочки возвращаются в гранулятор 11 через ленточный конвейер 16 для превращения в более крупные кусочки. Всё это происходит в большом цикле: мелкие и крупные фракции постоянно возвращаются для воспроизводства в нужном размере. Таким образом, промышленное внедрение подобных технологических схем играет важную роль в утилизации фосфогипса, который в настоящее время является крупнотоннажным отходом.

Технико-экономические показатели в основном связаны с активацией низкосортного фосфорита малой нормой кислоты. При этом для оптимально выбранного образца (образец № 12) соотношение фосфорит: ЭФК: фосфогипс: глауконит = (0,6: 1: 0,6: 0,6). Использование отхода производства — фосфогипса, а также местного сырья — глауконита, в количестве, сопоставимом с количеством фосфорита, обусловлено тем, что при меньшем расходе кислоты на активацию фосфорита обеспечивается получение большего количества комплексного удобрения. Начальный материальный баланс производства комплексного удобрения в расчёте на 1000 кг фосфоритной муки составляет: фосфоритная мука — 1000 кг, экстракционная фосфорная кислота (ЭФК, 16,5 % P_2O_5) — 1600,0 кг, фосфогипс — 1000 кг, глауконит — 1000 кг. В процессе грануляции дополнительная вода не расходуется, поскольку

влажность реакционной массы является достаточной. Количество выделившегося CO_2 составляет 1,34 %, а масса готового комплексного удобрения составляет приблизительно 3245 кг.

Готовый продукт сушат в сушильном аппарате при температуре 80–90 °С до достижения остаточной влажности 1–3 %. Данные показатели способствуют снижению себестоимости продукции и обеспечивают экономическую устойчивость технологии. Экономические показатели данного исследования — сметные затраты и рентабельность — должны быть рассчитаны на последующих этапах проведения исследований в более крупном масштабе.

Агрохимические показатели предлагаемого комплексного удобрения имеют важное значение благодаря объединению в составе одного продукта необходимых для питания растений элементов — фосфора (P), кальция (Ca), калия (K), азота (N), серы (S), а также микроэлементов (Zn, Mn, Cu, Mo, B). Более глубокое изучение агрохимических показателей должно быть проведено в более широком масштабе. В предлагаемом комплексном удобрении выявлен ряд отличий по сравнению с традиционными промышленными технологиями производства. При традиционных способах (например, при производстве суперфосфата и аммофоса путём полного разложения фосфорита серной кислотой (H_2SO_4) и азотной кислотой (HNO_3)) требуется активация высокосортного фосфорита полной нормой кислоты. Кроме того, при производстве аммофоса в значительных количествах образуется фосфогипс. В предлагаемой технологии комплексного удобрения предусмотрена переработка низкосортного фосфорита неполной нормой кислоты (20 %), использование фосфогипса в качестве сырья, а также совместное применение глауконита как местного сырья. Дополнительно следует отметить, что основное технологическое оборудование, применяемое в предложенной схеме (смеситель, гранулятор, сушильный барабан, грохот), относится к стандартному оборудованию, широко используемому на предприятиях по производству фосфорных удобрений, что обеспечивает возможность внедрения технологии без значительных дополнительных капитальных затрат. Настоящая работа выполнена в лабораторном масштабе. Основной целью исследования является определение химических и физико-механических показателей процесса получения комплексного удобрения путём активации низкосортного фосфорита малыми нормами кислот с последующим введением фосфогипса и глауконита. Проведение процесса в промышленном масштабе, выполнение опытно-промышленных испытаний, изучение агрохимических показателей в полевых условиях, проведение технико-экономических расчётов, а также определение содержания тяжёлых металлов и вредных примесей в составе готового продукта являются следующим этапом данного исследования.

Заключение

Результаты испытаний показывают, что можно приготовить особый вид удобрения, смешав фосфоритовую муку Центрального Кызылкума с определённым количеством фосфорной кислоты, а затем добавив фосфогипс и глауконит. Это привело к разработке четырёхэтапного процесса, который может повторяться в цикле. Добавленные ингредиенты не только улучшают способность удобрения восстанавливать почву, но и увеличивают

количество полезного фосфора и кальция, снижают кислотность смеси, что в свою очередь снижает потребность в аммиаке и защищает оборудование от повреждений. Новый метод снижает потребность в сильных кислотах и использует два крупных промышленных побочных продукта — фосфогипс и глауконит — для создания сложного удобрения, которое одновременно полезно для окружающей среды и эффективно использует ресурсы.

Список литературы

1. Bello, S.K. Mitigating soil salinity stress with gypsum and bio-organic amendments: A review / S.K. Bello, A.H. Alayafi, S.G. Al-Solaimani, K.A. M. Abo-Elyousr // *Agronomy*. – 2021. – Т. 11, № 9. – DOI: 10.3390/agronomy11091735.
2. Dasi, E. Glauconite applications in agriculture: A review of recent advances / E. Dasi, M. Rudmin, S. Banerjee // *Applied Clay Science*. – 2024. – Т. 253. – DOI: 10.1016/j.clay.2024.107368.
3. Dimkpa, C. Fertilizers for food and nutrition security in sub-Saharan Africa: An overview of soil health implications / C. Dimkpa, W. Adzawla, R. Pandey, W.K. Atakora, A.K. Kouame, M. Jemo, P.S. Bindraban // *Frontiers in Soil Science*. – 2023. – Т. 3. – DOI: 10.3389/fsoil.2023.1123931.
4. Guan, Q. The impurity removal and comprehensive utilization of phosphogypsum: A review / Q. Guan, Z. Wang, F. Zhou, W. Yu, Z. Yin, Z. Zhang, R. Chi, J. Zhou // *Materials*. – 2024. – Т. 17, № 9. – DOI: 10.3390/ma17092067.
5. Habib, M. The future of the future foods: understandings from the past towards SDG-2 / M. Habib, S. Singh, S. Jan, K. Jan, K. Bashir // *Npj Science of Food*. – 2025. – Т. 9, № 1. – DOI: 10.1038/s41538-025-00484-x.
6. Otaboev, K.A. Mineralogical composition of kyzylkum washed dry concentrate and its processing into simple superphosphate / K.A. Otaboev, D.S. Sherkuziev, O.A. Badalova [et al.] // *Russian Journal of General Chemistry*. – 2022. – Т. 92, № 3. – P. 505–517. – DOI: 10.1134/S1070363222030203.
7. Raiymbekov, Y. Enrichment of low-grade phosphorites by the selective leaching method / Y. Raiymbekov, P. Abdurazova, U. Nazarbek // *Green Processing and Synthesis*. – 2023. – Т. 12, № 1. – DOI: 10.1515/gps-2022-8150.
8. Sakrabani, R. Opportunities and challenges organo-mineral fertiliser can play in enabling food security / R. Sakrabani // *Frontiers in Sustainable Food Systems*. – 2024. – Т. 8. – DOI: 10.3389/fsufs.2024.1296351.
9. Shabana, M.M. A. Utilizing glauconite extracts to enhance soil health and sugar beet (*Beta Vulgaris* L.) performance in salt-affected soil / M.M. A. Shabana, H. a. S. Alhaithloul, M.F. Alaida, M.K. ElGhannam, A.E. El-Sherief, A.F. M. Badawy, M. Shokr, N.Y. Rebouh, M. El-Sharkawy // *PLoS ONE*. – 2026. – Т. 21, № 2. – DOI: 10.1371/journal.pone.0337492.
10. Shaymardanova, M. Studying of the process of obtaining Monocalcium phosphate based on extraction phosphoric acid from phosphorites of Central Kyzylkum / M. Shaymardanova, Kh. Mirzakulov, G. Melikulova, S. Khodjamkulov, A. Nomozov, O. Toshmamatov // *Baghdad Science Journal*. – 2024. – Т. 21, № 12. – DOI: 10.21123/bsj.2024.9836.

-
11. Younes, H.H. Exploring phosphorus dissociation kinetics in HCl-leached moderate-grade phosphate ores: Towards high-quality dicalcium phosphate production / H.H. Younes, L. Qin, A.S. Ahmed, F. Jia, S. Song, W. Zhan // Minerals Engineering. – 2025. – Т. 231. – DOI: 10.1016/j.mineng.2025.109480.

Статья поступила в редакцию: 27.06.2026

Статья принята к публикации: 19.07.2026

Статья опубликована: 28.08.2026

УДК 547.26+547.593+678.7

DOI: 10.32743/UniTech.2026.149.8.23223

Получение и свойства олигомерных соединений, содержащих серу и азот на основе эпихлоргидрина и 2,4,6-триметил-1,3,5-триазина

Логинов Антон Викторович
PhD

доц. Новосибирский государственный технический университет
Российская Федерация, г. Санкт-Петербург

Шодиева Маъмура Рауповна

магистр, Бухарский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Бухара

Шарипов Бегмурод Шаропович
PhD

доц., Бухарский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Бухара
E-mail: sharipovbekki91@gmail.com

Preparation and properties of oligomeric compounds containing sulfur and nitrogen based on epichlorohydrin and 2,4,6-trimethyl-1,3,5-triazine

Loginov Anton Viktorovich
PhD, Associate Professor

Novosibirsk State Technical University
Russian Federation, St. Petersburg

Shodieva Mamura Raupovna

Master, Bukhara State Technical University
Republic of Uzbekistan, Bukhara

Sharipov Begmurod Sharopovich
PhD, Associate Professor

Bukhara State Technical University
Republic of Uzbekistan, Bukhara

Аннотация

Целью данной научно-исследовательской работы является разработка эффективных технологических методов синтеза и комплексное исследование физико-химических свойств новых серо- и азотсодержащих гетероцепных олигомерных соединений. В статье подробно

Библиографическое описание: Логинов А.В., Шодиева М.Р., Шарипов Б.Ш. Получение и свойства олигомерных соединений, содержащих серу и азот на основе эпихлоргидрина и 2,4,6-триметил-1,3,5-триазина // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 8(149). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23223>

изучены закономерности процессов получения указанных олигомеров, содержащих в своей макромолекулярной структуре функциональные атомы серы и азота. Синтез целевых продуктов осуществлялся на основе направленного химического взаимодействия эпихлоргидрина с 2,4,6-триметил-1,3,5-триазином при варьировании различных параметров протекания реакции. В ходе выполнения работы были детально исследованы, систематизированы и оптимизированы ключевые технологические условия, включая температурные режимы, общую продолжительность кинетических процессов, а также мольное соотношение исходных реагирующих компонентов. С применением методов современного физико-химического анализа, включая ИК-спектроскопию, досконально определены молекулярное строение, элементный состав и базовые эксплуатационные характеристики полученных олигомеров. Экспериментальным путем надежно установлено, что последовательное введение функциональных гетероатомов серы и азота в основную цепь существенно модифицирует структуру макромолекул. Данный фактор способствует значительному повышению показателей термической устойчивости, высокой химической стойкости к воздействию агрессивных сред, а также существенному улучшению адгезионных свойств синтезированных соединений. На основании комплекса полученных результатов научно обоснованы перспективные направления практического применения разработанных олигомерных материалов. Выявлено, что данные олигомеры могут успешно использоваться в качестве высокоэффективных модификаторов при производстве высокотемпературных термостойких полимеров, долговечных защитных антикоррозионных покрытий, а также связующих компонентов для создания современных multifunctional композиционных материалов различного назначения.

Abstract

The primary objective of this research work is to develop effective technological methods for the synthesis and to conduct a comprehensive investigation of the physicochemical properties of novel sulfur- and nitrogen-containing heterochain oligomeric compounds. The article details the regularities of the processes for obtaining these oligomers, which incorporate functional sulfur and nitrogen atoms into their macromolecular structure. The synthesis of the target products was carried out based on the directed chemical interaction of epichlorohydrin with 2,4,6-trimethyl-1,3,5-triazine under varying reaction parameters. In the course of the work, key technological conditions were thoroughly investigated, systematized, and optimized, including temperature regimes, the total duration of kinetic processes, and the molar ratio of the initial reacting components. Utilizing modern physicochemical analysis methods, including IR spectroscopy, the molecular structure, elemental composition, and basic performance characteristics of the obtained oligomers were thoroughly determined. It was reliably established experimentally that the sequential introduction of functional sulfur and nitrogen heteroatoms into the main chain significantly modifies the macromolecular structure. This factor contributes to a significant increase in thermal stability, high chemical resistance to aggressive environments, and a substantial improvement in the adhesion properties of the synthesized compounds. Based on the complex of obtained results, promising directions for the practical application of the developed oligomeric materials are scientifically substantiated. It was revealed that these oligomers can be successfully used as highly effective

modifiers in the production of high-temperature heat-resistant polymers, durable protective anti-corrosion coatings, and as binding components for creating modern multifunctional composite materials for various purposes.

Ключевые слова: эпихлоргидрин, триазин, олигомерные соединения, азотсодержащие соединения, серосодержащие соединения, поликонденсация, термостойкость, химия полимеров, гетероциклические соединения, синтетические материалы.

Keywords: epichlorohydrin, triazine, oligomeric compounds, nitrogen-containing compounds, sulfur-containing compounds, polycondensation, heat resistance, polymer chemistry, heterocyclic compounds, synthetic materials.

Введение

В настоящее время большое внимание уделяется синтезу олигомерных соединений, содержащих гетероатомы серы и азота. Такие вещества обладают высокой химической стойкостью, термостойкостью, хорошими адгезионными свойствами и могут применяться в производстве полимерных материалов, защитных покрытий, клеев и ионообменных смол. Особый интерес представляют соединения на основе эпихлоргидрина и производных триазина. Эпихлоргидрин является важным мономером для получения эпоксидных и олигомерных материалов. 2,4,6-триметил-1,3,5-триазин содержит азотсодержащий триазиновый цикл, который повышает устойчивость и реакционную способность получаемых соединений.

2. Целью данной работы является изучение получения и свойств серо- и азотсодержащих олигомерных соединений на основе эпихлоргидрина и 2,4,6-триметил-1,3,5-триазина. Олигомеры представляют собой соединения, состоящие из небольшого числа повторяющихся звеньев. Введение атомов серы и азота в структуру олигомеров способствует улучшению их физико-химических характеристик. Эпихлоргидрин содержит эпоксидную группу, благодаря которой легко вступает в реакции поликонденсации и нуклеофильного присоединения. Триазиновое кольцо, содержащее три атома азота, обеспечивает высокую термическую устойчивость. При взаимодействии эпихлоргидрина с серосодержащими реагентами и производными триазина происходит образование пространственно-сшитых олигомерных структур.

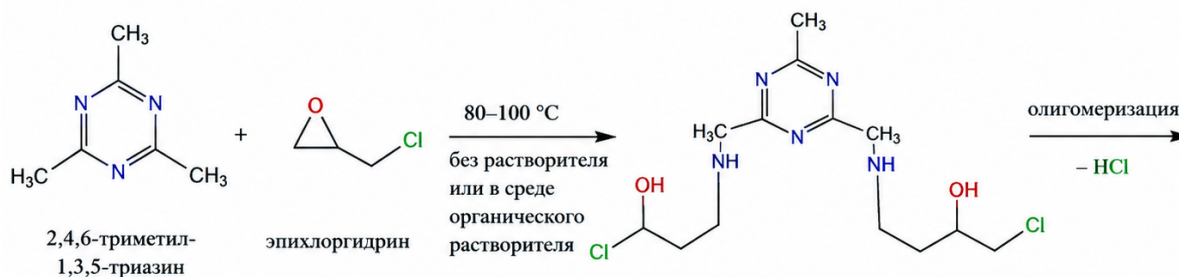
Материалы и методы

3. Методы исследования: В ИК-спектрах синтезированных соединений можно наблюдать: полосы поглощения О–Н групп в области $3200\text{--}3500\text{ см}^{-1}$, колебания связей С–N триазинового цикла в области $1450\text{--}1650\text{ см}^{-1}$, полосы С–S связей в области $650\text{--}750\text{ см}^{-1}$. Это подтверждает образование азот- и серосодержащего олигомера. Для изучения структуры и свойств олигомеров применяются следующие методы: ИК-спектроскопия; элементный анализ; термогравиметрический анализ; определение молекулярной массы; исследование растворимости. ИК-спектры позволяют определить наличие: эпоксидных групп; связей С–N; связей С–S; гидроксильных групп. Серо- и азотсодержащие олигомеры на основе эпихлоргидрина и триазина могут использоваться: при производстве термостойких

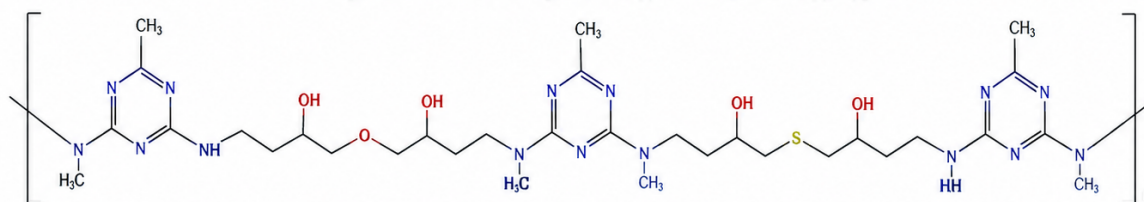
полимеров; в качестве защитных покрытий; для получения клеевых композиций; в электроизоляционных материалах; в химически стойких пластиках. Полученные результаты показывают, что синтезированные олигомерные соединения на основе эпихлоргидрина и 2,4,6-триметил-1,3,5-триазина обладают комплексом ценных физико-химических свойств, позволяющих рассматривать их как перспективные материалы для создания функциональных полимерных систем.

4. Получение олигомерных соединений: Синтез проводился путем взаимодействия эпихлоргидрина с 2,4,6-триметил-1,3,5-триазином в присутствии серосодержащего компонента. Синтез олигомерных соединений, содержащих атомы серы и азота, представляет большой интерес в области современной химии полимеров. Это связано с тем, что введение гетероатомов в структуру полимерной цепи способствует улучшению физико-химических и эксплуатационных свойств материалов. В данной работе в качестве основного исходного вещества был использован эпихлоргидрин, обладающий высокой реакционной способностью благодаря наличию эпоксидной группы. В процессе синтеза эпихлоргидрин взаимодействовал с 2,4,6-триметил-1,3,5-триазином в присутствии серосодержащего реагента. Реакция проводилась в органической среде при температуре 70–90 °С с использованием катализатора. Во время процесса происходило раскрытие эпоксидного кольца эпихлоргидрина, в результате чего образовывались новые связи между атомами углерода, азота и серы.

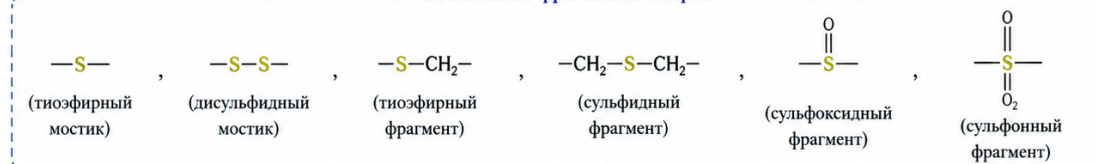
Получение олигомерных соединений, содержащих серу и азот, на основе эпихлоргидрина и 2,4,6-триметил-1,3,5-триазина



Олигомерное соединение, содержащее серу и азот (общая структура)



Возможные фрагменты с серой



N – азот

O – кислород

S – сера

Cl – хлор

Рисунок 1. Связи между атомами углерода, азота и серы

Полученные олигомерные соединения представляли собой вязкие вещества светло-жёлтого цвета, хорошо растворимые в некоторых органических растворителях. Исследования показали, что наличие триазинового цикла в структуре олигомера способствует повышению термической устойчивости материала. Кроме того, атомы серы улучшают химическую стойкость и эластичность полученных соединений. Для изучения структуры и свойств синтезированных олигомеров были использованы современные физико-химические методы анализа. С помощью ИК-спектроскопии были обнаружены полосы поглощения, соответствующие связям C–N, C–S и гидроксильным группам. Это подтверждает образование серо- и азотсодержащих олигомерных структур. Термогравиметрический анализ показал, что полученные соединения обладают высокой термической стабильностью и сохраняют свои свойства при повышенных температурах. Данное свойство позволяет рассматривать синтезированные олигомеры как перспективные материалы для производства защитных покрытий, клеевых композиций, электроизоляционных материалов и химически стойких полимеров. Таким образом, результаты исследования показывают, что взаимодействие эпихлоргидрина с триазиновыми соединениями в присутствии серосодержащих компонентов является эффективным методом получения новых функциональных олигомеров с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Результаты и обсуждение

В ходе проведённых исследований были изучены физико-химические свойства синтезированных серо- и азотсодержащих олигомерных соединений на основе эпихлоргидрин и 2,4,6-триметил-1,3,5-триазин. Полученные результаты показали, что структура исходных компонентов существенно влияет на свойства конечного продукта. Анализ ИК-спектров подтвердил образование новых химических связей в структуре олигомера. В спектрах наблюдались полосы поглощения, характерные для связей C–N и C–S, что свидетельствует о включении атомов азота и серы в олигомерную цепь. Кроме того, уменьшение интенсивности полос эпоксидной группы указывает на протекание реакции раскрытия эпоксидного цикла эпихлоргидрина C–N, C–S, OH.

Исследование термических свойств показало, что синтезированные соединения обладают повышенной термостойкостью по сравнению с обычными эпоксидными олигомерами. Это объясняется присутствием триазинового цикла, который повышает жёсткость и устойчивость структуры к воздействию высоких температур. Также было установлено, что наличие атомов серы способствует улучшению химической стойкости и эластичности материала. Полученные олигомеры проявили хорошую растворимость в органических растворителях и высокую адгезию к металлическим поверхностям. Результаты исследования позволяют сделать вывод о перспективности использования синтезированных олигомерных соединений в качестве основы для термостойких покрытий, клеевых композиций, электроизоляционных материалов и специальных полимерных систем. Начало формы Реакцию проводили при нагревании в органическом растворителе при температуре 60–90 °C в присутствии катализатора. В результате образовывался вязкий олигомер светло-жёлтого цвета.

Схема получения олигомерных соединений, содержащих серу и азот, на основе эпихлоргидрина и 2,4,6-триметил-1,3,5-триазина

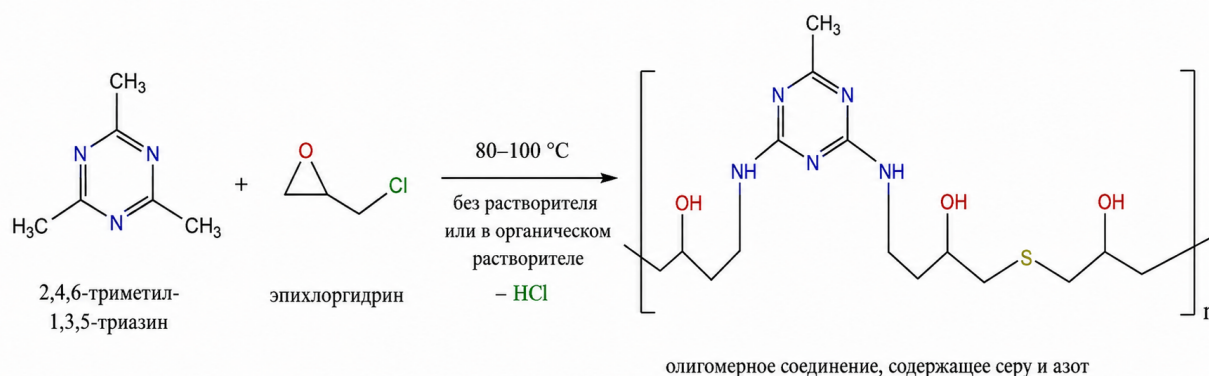


Рисунок 2. Схема получения

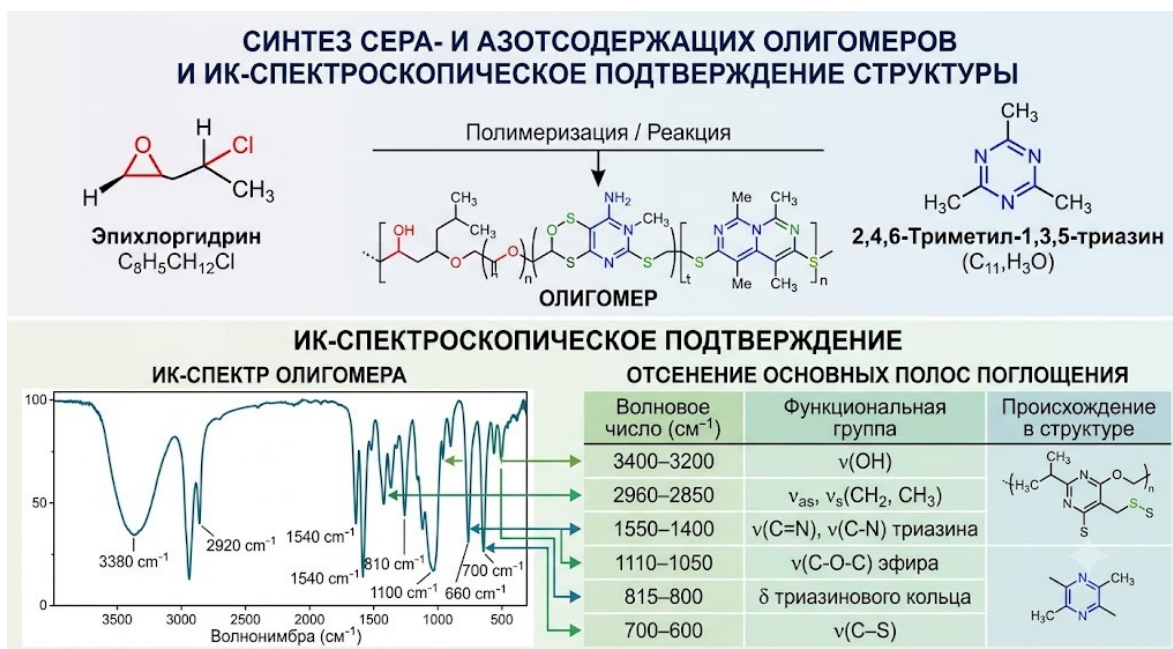


Рисунок 3. Схема получения

5. Свойства полученных олигомеров: Полученные олигомерные соединения на основе эпихлоргидрина и 2,4,6-триметил-1,3,5-триазина обладают рядом ценных физико-химических свойств, обусловленных наличием в структуре атомов азота и серы. Синтезированные олигомеры хорошо растворяются в полярных органических растворителях, таких как: диметилформамид (ДМФА), диметилсульфоксид (ДМСО), ацетон, спирты. Ограниченная растворимость в воде объясняется присутствием гидрофобных углеводородных фрагментов и сшитой структуры олигомера. Наличие триазинового цикла в структуре олигомера способствует повышению термической стабильности соединений. Полученные продукты сохраняют устойчивость при повышенных температурах и характеризуются замедленным процессом термического разложения. Азот и серо содержащие фрагменты повышают устойчивость материала к термоокислительной деструкции. Олигомеры проявляют

устойчивость: к действию разбавленных кислот, слабых щелочей, органических растворителей. Это связано с присутствием гетероциклического триазинового ядра и прочных связей C–N и C–S.

6. Наличие функциональных групп: гидроксильных (–OH), аминных (–NH), серосодержащих фрагментов создаёт возможность дальнейшей модификации олигомеров и получения на их основе: полимерных покрытий, ионообменных материалов, термостойких композиций, клеевых и защитных материалов. Благодаря высокой термической устойчивости и наличию активных функциональных групп полученные олигомеры могут применяться: в качестве связующих материалов, при создании антикоррозионных покрытий, для синтеза модифицированных полимеров, в производстве термостойких композиционных материалов. Полученные соединения обладают следующими свойствами: хорошая растворимость в органических растворителях; повышенная термостойкость; устойчивость к действию кислот и щелочей; наличие реакционноспособных функциональных групп; хорошие адгезионные свойства. Термостойкость объясняется присутствием триазинового цикла, а атомы серы способствуют повышению эластичности и химической устойчивости материала.

7. Заключение: В результате проведённых исследований были синтезированы олигомерные соединения, содержащие атомы серы и азота, на основе эпихлоргидрин и 2,4,6-триметил-1,3,5-триазин. Установлено, что взаимодействие исходных компонентов приводит к образованию функциональных олигомерных структур, содержащих гидроксильные, аминные и серосодержащие фрагменты. Полученные соединения обладают повышенной термической устойчивостью, химической стойкостью и способностью к дальнейшей химической модификации. Наличие триазинового цикла и атомов серы способствует улучшению эксплуатационных характеристик синтезированных материалов. Показано, что синтезированные олигомеры могут представлять практический интерес в качестве основы для получения термостойких полимерных материалов, защитных покрытий, композиционных систем и функциональных полимеров специального назначения. Таким образом, синтезированы олигомерные соединения на основе эпихлоргидрина и 2,4,6-триметил-1,3,5-триазина, содержащие атомы серы и азота. Полученные вещества обладают высокой термической и химической устойчивостью, что делает их перспективными для применения в различных областях химической промышленности и материаловедения.

В данной работе рассмотрены методы получения олигомерных соединений, содержащих серу и азот, на основе эпихлоргидрин и производных 1,3,5-триазин. Проведённый анализ литературных источников показал, что введение атомов серы и азота в структуру олигомеров способствует улучшению их физико-химических и эксплуатационных свойств. Такие соединения обладают повышенной термической устойчивостью, хорошей химической стойкостью и способностью к образованию прочных пространственных структур. На основании литературных данных установлено, что использование эпихлоргидрина в реакциях поликонденсации позволяет получать олигомеры с высокой реакционной способностью и хорошей адгезией к различным материалам. Производные триазина, содержащие атомы азота, обеспечивают дополнительную

стабильность структуры и повышают огнестойкость полученных материалов. Наличие серосодержащих фрагментов также положительно влияет на механическую прочность и устойчивость к воздействию агрессивных сред.

Анализ научных публикаций показывает, что серо и азот содержащие олигомеры имеют широкие перспективы практического применения. Они могут использоваться при создании защитных покрытий, клеевых композиций, термостойких полимерных материалов, модифицированных смол и композиционных систем специального назначения. Кроме того, благодаря сочетанию функциональных групп данные соединения представляют интерес для дальнейших исследований в области высокомолекулярной химии и материаловедения. Таким образом, результаты обзора литературы подтверждают актуальность исследований, связанных с синтезом новых олигомерных соединений, содержащих серу и азот. Разработка подобных материалов открывает возможности получения полимеров с улучшенными свойствами и расширяет области их промышленного применения.

Заключение

Анализ литературных источников показал, что олигомерные соединения, содержащие серу и азот, относятся к перспективным функциональным материалам современной полимерной химии. Установлено, что применение эпихлоргидрина и производных триазина позволяет получать олигомеры с высокой химической активностью и устойчивостью к термическому воздействию. Введение атомов серы в структуру олигомеров способствует повышению механической прочности, химической стойкости и устойчивости к агрессивным средам. Азотсодержащие триазиновые фрагменты улучшают термостойкость, огнестойкость и стабильность пространственной структуры полимеров. По данным литературы, синтезированные соединения могут применяться в производстве защитных покрытий, клеевых материалов, композиционных полимеров и специальных технических смол. Проведённый литературный обзор подтверждает перспективность дальнейших исследований в области получения новых серо- и азотсодержащих олигомеров с заданными физико-химическими свойствами.

Список литературы

1. Анохин, А.В. 1,3,5-Триазин и его производные в химии высокомолекулярных соединений / А.В. Анохин, М.А. Горбунова, Д.В. Анохин // Химическая промышленность сегодня. – 2022. – № 5. – С. 41–46.
2. Антонов В., Котов А.В., Павлов А.А., Смирнов А.С. Современные методы модификации эпоксидных олигомеров // Химическая технология. – 2022. – № 11. – С. 33–39.
3. Болдырев, В.С. Методы получения термостойких олигомерных соединений / В.С. Болдырев, В.В. Меньшиков // Современные наукоёмкие технологии. – 2021. – № 9. – С. 18–22.
4. Данилов С.Н. Основы химии и технологии полимеров. – Санкт. – Петербург: Химиздат, 2019. – 420 с.

5. Дебердеев, Т.Р. Термостойкие полимерные материалы специального назначения / Т.Р. Дебердеев, А.И. Ахметшина, Л.К. Каримова [и др.] // Успехи современной химии. – 2020. – Т. 89, № 6. – С. 701–709.
6. Коршак, В.В. Химия высокомолекулярных соединений / В.В. Коршак. – Москва: Химия, 2017. – 560 с.
7. Крылов, В.А. Эпихлоргидрин в синтезе полимеров и олигомеров / В.А. Крылов, А.В. Крылов, А.А. Соловьянов // Журнал прикладной химии. – 2018. – Т. 91, № 4. – С. 520–528.
8. Кучин, А.В. Серо- и азотсодержащие полимеры: свойства и области применения / А.В. Кучин, Ю.И. Рябков, Л.Ю. Назарова, И.Б. Смирнов // Композиционные материалы. – 2023. – Т. 15, № 1. – С. 55–63.
9. Логинов, А.В. 2,4,6-триметил-1,3,5-триазин и его производные в синтезе функциональных материалов / А.В. Логинов, М.Р. Шодиева, Б.Ш. Шарипов // Химическая технология. – 2021. – № 5. – С. 44–49.
10. Пахомов, П.М. Исследование физико-химических свойств серосодержащих олигомеров / П.М. Пахомов, А.Н. Адамян, С.Д. Хижняк // Высокомолекулярные соединения. – 2021. – Т. 63, № 2. – С. 145–152.
11. Рахматуллина, А.П. Эпихлоргидрин в синтезе полимерных материалов / А.П. Рахматуллина, Н.С. Сатбаева, Е.Н. Черезова, А.С. Изергина // Журнал прикладной химии. – 2020. – Т. 93, № 4. – С. 512–518.
12. Суслов, В.И. Синтез азотсодержащих полимеров на основе производных триазина / В.И. Суслов, В.Н. Заплишный, Г.М. Погосян // Пластические массы. – 2019. – № 7. – С. 23–27.
13. Тагер, А.А. Физико-химия полимеров / А.А. Тагер. – Москва: Научный мир, 2018. – 576 с.

References

1. Anokhin A.V., Gorbunova M.A., Anokhin D.V. [1,3,5-Triazine and its derivatives in the chemistry of high-molecular compounds]. *Khimicheskaya promyshlennost' segodnya*, 2022, no. 5, P. 41–46. (In Russ.)
2. Antonov V., Kotov A.V., Pavlov A.A., Smirnov A.S. [Modern methods for modifying epoxy oligomers]. *Khimicheskaya tekhnologiya*, 2022, no. 11, P. 33–39. (In Russ.)
3. Boldyrev V.S., Menshikov V.V. [Methods for obtaining heat-resistant oligomeric compounds]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*, 2021, no. 9, P. 18–22. (In Russ.)
4. Danilov S.N. [Fundamentals of polymer chemistry and technology]. Saint Petersburg, Khimizdat Publ., 2019. 420 P. (In Russ.)
5. Deberdeev T.R., Akhmetshina A.I., Karimova L.K., et al. [Heat-resistant polymer materials for special purposes]. *Uspekhi sovremennoi khimii*, 2020, vol. 89, no. 6, P. 701–709. (In Russ.)
6. Korshak V.V. [Chemistry of high-molecular compounds]. Moscow, Khimiya Publ., 2017. 560 P. (In Russ.)

7. Krylov V.A., Krylov A.V., Solovyanov A.A. [Epichlorohydrin in the synthesis of polymers and oligomers]. Zhurnal prikladnoi khimii, 2018, vol. 91, no. 4, P. 520–528. (In Russ.)
8. Kuchin A.V., Ryabkov Yu.I., Nazarova L.Yu., Smirnov I.B. [Sulfur- and nitrogen-containing polymers: properties and applications]. Kompozitsionnye materialy, 2023, vol. 15, no. 1, P. 55–63. (In Russ.)
9. Loginov A.V., Shodieva M.R., Sharipov B.Sh. [2,4,6-Trimethyl-1,3,5-triazine and its derivatives in the synthesis of functional materials]. Khimicheskaya tekhnologiya, 2021, no. 5, P. 44–49. (In Russ.)
10. Pakhomov P.M., Adamyan A.N., Khizhnyak S.D. [Study of the physicochemical properties of sulfur-containing oligomers]. Vysokomolekulyarnye soedineniya, 2021, vol. 63, no. 2, P. 145–152. (In Russ.)
11. Rakhmatullina A.P., Satbaeva N.S., Cherezova E.N., Izergina A.S. [Epichlorohydrin in the synthesis of polymer materials]. Zhurnal prikladnoi khimii, 2020, vol. 93, no. 4, P. 512–518. (In Russ.)
12. Suslov V.I., Zaplishnyi V.N., Pogosyan G.M. [Synthesis of nitrogen-containing polymers based on triazine derivatives]. Plasticheskie massy, 2019, no. 7, P. 23–27. (In Russ.)
13. Tager A.A. [Physicochemistry of polymers]. Moscow, Nauchnyi mir Publ., 2018. 576 P. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию: 26.06.2026

Статья принята к публикации: 01.08.2026

Статья опубликована: 28.08.2026

УДК 622.34+546.89+628.16

Экспериментальное исследование процесса получения коагулянта методом кислотного разложения руды месторождения Тебинбулак

Мансурова Шабнам Мирзохид кизи
аспирант

Навоийский государственный университет горного дела и технологий

Республика Узбекистан, г. Навои

E-mail: shabnammansurova67@gmail.com

Experimental study of coagulant production by acid leaching of ore from the Tebinbulak deposit

Mansurova Shabnam Mirzokhid qizi
PhD student

Navoi State University of Mining and Technologies

Republic of Uzbekistan, Navoi

Аннотация

В данной работе исследован процесс кислотного разложения железосодержащей руды месторождения Тебинбулак с целью определения рациональных технологических параметров получения раствора хлорида железа(III), предназначенного для последующего применения в качестве коагулянта. В качестве исходного сырья использовали руду с содержанием Fe_2O_3 25,6 %, измельчённую до фракций 0,25; 0,50 и 1,00 мм. Эксперименты проводили с применением растворов соляной кислоты концентрацией 26-32 % при различных соотношениях руды и кислоты, температуре 25 °С, скорости перемешивания 150-300 об/мин и продолжительности процесса до 120 мин. После завершения кислотного разложения полученные жидкую и твёрдую фазы разделяли фильтрованием. Определены содержание образовавшегося FeCl_3 , остаточных Fe_2O_3 и HCl , а также плотность и динамическая вязкость полученного раствора. Состав и морфологические особенности исходного и термически обработанного сырья изучали методом сканирующей электронной микроскопии с элементным анализом. Установлено, что наиболее эффективное растворение руды достигается при концентрации HCl 32 %, размере частиц 0,25 мм, скорости перемешивания 200 об/мин и продолжительности процесса 120 мин. При соотношении руда: HCl = 1:1 содержание FeCl_3 в растворе достигло 39,61 %, плотность составила 1,135 г/см³, а

Библиографическое описание: Мансурова Ш.М. кизи Экспериментальное исследование процесса получения коагулянта методом кислотного разложения руды месторождения Тебинбулак // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 8(149). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23271>

динамическая вязкость - 1,92 мПа·с. Полученные результаты подтверждают перспективность использования руды месторождения Тебинбулак в качестве местного сырья для производства железосодержащих коагулянтов.

Abstract

In this study, we investigated the acid leaching of iron-bearing ore from the Tebinbulak deposit to determine rational technological parameters for producing an iron(III) chloride solution intended for subsequent use as a coagulant. Ore containing 25.6 wt.% Fe_2O_3 and ground to particle sizes of 0.25, 0.50, and 1.00 mm was used as the initial raw material. The experiments were conducted using hydrochloric acid solutions with concentrations ranging from 26 to 32 wt.% at various ore-to-acid ratios, a temperature of 25 °C, stirring speeds of 150-300 rpm, and process durations of up to 120 min. After acid leaching, the resulting liquid and solid phases were separated by filtration. We determined the contents of the produced FeCl_3 , residual Fe_2O_3 , and unreacted HCl , as well as the density and dynamic viscosity of the resulting solution. The composition and morphological characteristics of the initial and heat-treated raw materials were examined by scanning electron microscopy coupled with elemental analysis. It was established that the most effective ore dissolution was achieved at an HCl concentration of 32 wt.%, a particle size of 0.25 mm, a stirring speed of 200 rpm, and a process duration of 120 min. At an ore-to- HCl ratio of 1:1, the FeCl_3 content in the solution reached 39.61 wt.%, while its density and dynamic viscosity were 1.135 g/cm³ and 1.92 mPa·s, respectively. The obtained results confirm the potential of using ore from the Tebinbulak deposit as a local raw material for producing iron-based coagulants.

Ключевые слова: железная руда, соляная кислота, кислотное выщелачивание, хлорид железа(III), железосодержащий коагулянт, соотношение твёрдой и жидкой фаз, SEM–EDS, плотность, вязкость.

Keywords: iron ore, hydrochloric acid, acid leaching, ferric chloride, iron-containing coagulant, solid-to-liquid ratio, SEM–EDS, density, viscosity.

Введение

Коагуляция и последующая флокуляция широко применяются для дестабилизации коллоидных и мелкодисперсных примесей в природных и промышленных водах. К числу наиболее распространённых неорганических реагентов относятся соли железа, включая хлорид железа(III). Эффективность таких реагентов определяется не только их химическим составом, но и дозировкой, pH обрабатываемой воды, температурой, режимом перемешивания и характеристиками загрязняющих веществ [3, 1, 5–7, 9].

Одним из направлений ресурсосбережения является получение железосодержащих коагулянтов из природного и техногенного сырья, богатого оксидами железа. В ряде работ показана возможность перевода железа в раствор кислотным выщелачиванием рудных хвостов, металлургических отходов и золотшлаковых материалов с последующим получением хлоридных или смешанных железо-алюминиевых реагентов [2, 4, 10–12, 8]. При этом технологический результат существенно зависит от концентрации кислоты, температуры, продолжительности контакта, размера частиц и соотношения твёрдой и жидкой фаз.

Железосодержащая руда месторождения Тебинбулак представляет интерес как доступный источник железа для получения жидкого коагуляционного реагента. Однако для данного сырья недостаточно описано влияние расхода соляной кислоты и времени выщелачивания на содержание FeCl_3 , остаточной кислоты и физико-химические свойства раствора.

Цель исследования - определить влияние продолжительности кислотного разложения и массового соотношения руда: раствор HCl на состав, плотность и вязкость железосодержащего хлоридного раствора, получаемого из руды месторождения Тебинбулак, а также выполнить сравнительную SEM-EDS-характеристику исходного и обожжённого сырья.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования служила железосодержащая руда месторождения Тебинбулак, расположенная в Республике Каракалпакстан. Пробу измельчали в вибрационной мельнице, после чего разделяли по крупности на вибрационной просеивающей машине AS 450 Control. Для опытов использовали фракцию 0,25 мм. Часть материала обжигали при 700 °С в электрической печи SNOL XX/1300 для последующего сопоставления поверхностного элементного состава с исходной пробой.

Химический состав исходной руды выражали через массовые доли оксидных компонентов. Данные использовали для оценки содержания железооксидной составляющей и выбора условий кислотного разложения.

Выщелачивание проводили в реакционном сосуде объёмом 500 мл, оснащённом механической мешалкой. Температуру поддерживали на уровне 25 °С, скорость перемешивания - 200 об/мин, концентрацию раствора HCl - 32 %. Массовое соотношение руда: раствор HCl составляло 1:1, 1:2 и 1:3. Для каждого соотношения продолжительность процесса составляла 30, 60 и 120 мин. Основную реакцию растворения железооксидной составляющей представляли в виде: $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 6\text{HCl} \rightarrow 2\text{FeCl}_3 + 3\text{H}_2\text{O}$.

После завершения опыта суспензию фильтровали с разделением жидкой и твёрдой фаз. Для каждого режима определяли массовое соотношение твёрдого остатка и жидкой фазы после фильтрования, плотность и динамическую вязкость раствора. Остаточные массовые доли Fe_2O_3 и HCl , а также содержание FeCl_3 определяли по данным лабораторного анализа и материального баланса.

Поверхностный элементный состав исходной и обожжённой проб исследовали на сканирующем электронном микроскопе Thermo Fisher Scientific, оснащённом энергодисперсионным детектором Oxford Instruments. Результаты EDS использовали как локальную характеристику поверхности образцов; идентификация кристаллических минеральных фаз по данным EDS не выполнялась.

Экспериментальные результаты анализировали описательно по изменению показателей во времени и при разных соотношениях руда: HCl . В доступном наборе лабораторных данных отсутствовали сведения о параллельных повторностях и инструментальной погрешности, поэтому средние значения, стандартные отклонения и критерии

статистической значимости не рассчитывали. Испытания коагуляционной эффективности на модельных или реальных сточных водах, оценка стабильности при хранении и технико-экономический расчёт в объём настоящего исследования не входили.

Результаты и обсуждение

Среди определённых оксидных компонентов наибольшая массовая доля приходится на Fe_2O_3 - 25,6 %, далее следуют SiO_2 - 14,3 % и Al_2O_3 - 7,80 % (таблица 1). Наличие значимой железоксидной составляющей позволяет рассматривать исследуемую руду как сырьё для получения железосодержащего хлоридного раствора. Вместе с тем присутствие кремнезёма, оксида алюминия, титана и других компонентов обуславливает образование нерастворимого остатка и возможный переход сопутствующих элементов в жидкую фазу.

Таблица 1. Оксидный состав исходной руды месторождения Тебинбулак

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Компонент	Al_2O_3	SiO_2	SO_3	K_2O	CaO	TiO_2	V_2O_5	MnO	Fe_2O_3	ZnO	BaO
Массовая доля, %	7,80	14,3	0,22	1,21	0,10	0,48	0,01	0,25	25,6	0,02	0,08

При соотношении руда: HCl = 1:1 увеличение продолжительности процесса с 30 до 120 мин сопровождалось ростом массовой доли FeCl_3 с 38,59 до 39,61 % и снижением остаточного содержания Fe_2O_3 с 6,90 до 5,30 %. Одновременно остаточная доля HCl уменьшилась с 20,16 до 16,80 %, а плотность и вязкость раствора возросли соответственно с 1,128 до 1,135 г/см³ и с 1,84 до 1,92 мПа·с.

При соотношении 1:2 содержание FeCl_3 возрастало с 37,20 до 38,49 %, а остаточная доля Fe_2O_3 снижалась с 4,80 до 4,38 %. Однако остаточная кислотность после 120 мин составляла 25,25 %, что выше, чем при соотношении 1:1. При соотношении 1:3 наблюдалось наиболее высокое остаточное содержание HCl (51,47-55,76 %) и более низкая концентрация FeCl_3 (33,76-36,83 %), что указывает на избыточный расход кислоты и разбавление целевого раствора (таблица 2).

Таблица 2. Параметры кислотного разложения руды раствором соляной кислоты

(размер частиц - 0,25 мм; HCl - 32 %; температура - 25 °С; скорость перемешивания - 200 об/мин)

№	Время, мин	Руда : HCl	Остаток : жидкая фаза	Плотность, г/см ³	Вязкость, мПа·с	Остаточный Fe_2O_3 , %	Остаточная HCl , %	FeCl_3 , %
1	30	1:1	1:1,78	1,128	1,84	6,90	20,16	38,59
2	60	1:1	1:1,66	1,132	1,88	6,10	18,28	39,12
3	120	1:1	1:1,61	1,135	1,92	5,30	16,80	39,61
4	30	1:2	1:1,72	1,157	1,72	4,80	28,01	37,20
5	60	1:2	1:1,71	1,164	1,79	4,62	26,46	37,58

№	Вре- мя, ми н	Руда : HCl	Оста- ток :жидкая фаза	Плот- ность, г/см ³	Вяз- кость, мПа·с	Остаточн ый Fe ₂ O ₃ , %	Остаточ- ная HCl, %	FeCl ₃ , %
6	120	1:2	1:1,69	1,175	1,88	4,38	25,25	38,49
7	30	1:3	1:1,82	1,153	1,55	4,05	55,76	33,76
8	60	1:3	1:1,78	1,157	1,62	3,97	52,14	34,45
9	120	1:3	1:1,75	1,165	1,67	3,84	51,47	36,83

С точки зрения максимизации концентрации FeCl₃ наиболее результативным из исследованных режимов является соотношение 1:1 при 120 мин, при котором получено 39,61 % FeCl₃. Соотношение 1:2 может рассматриваться как компромиссный режим, поскольку обеспечивает более низкое остаточное содержание Fe₂O₃ (4,38 %), но сопровождается большим остатком кислоты. Полученная зависимость согласуется с общим представлением о том, что увеличение времени контакта повышает степень перехода железа в раствор, тогда как чрезмерный расход кислоты не обязательно увеличивает концентрацию целевого продукта [2, 4, 10–12, 8].

По данным локального EDS-анализа поверхности исходного образца массовые доли кислорода, железа и кремния составили соответственно 41,3; 20,9 и 14,6 %. После обжига при 700°C содержание указанных элементов составило 39,6; 18,8 и 13,6 % соответственно. В обоих пробах также обнаружены Ca, Mg, Al, Ti, Na, K, Mn и V в меньших количествах.

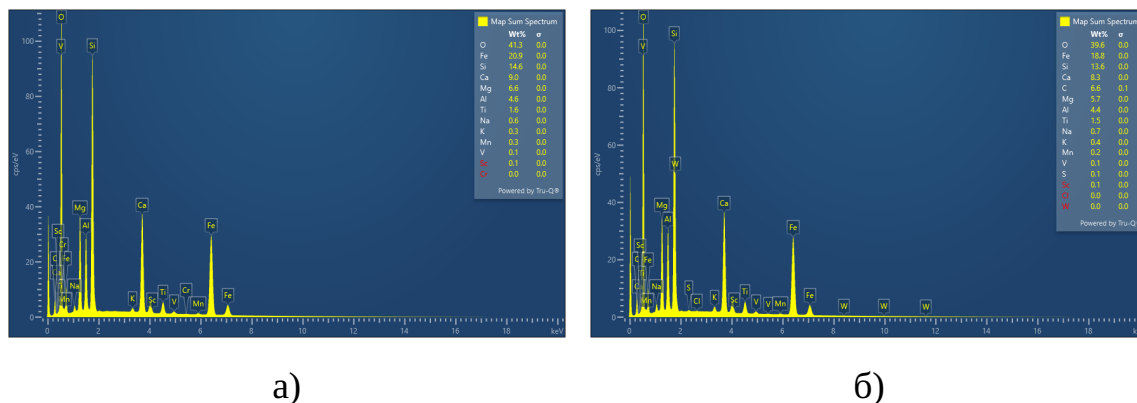


Рисунок 1. EDS-спектры руды месторождения Тебинбулак:

а) исходная проба; б) проба после обжига при 700°C.

Полученные EDS-данные подтверждают наличие железа и кислорода в поверхностном слое исследуемого материала и согласуются с результатами оксидного анализа. При этом SEM-EDS характеризует локальный участок поверхности и не позволяет однозначно установить содержание и соотношение гематита, магнетита, ильменита и других кристаллических фаз. Для их количественной идентификации требуется отдельный рентгенофазовый анализ.

Настоящая работа характеризует стадию получения железосодержащего раствора, но не доказывает эффективность его применения для очистки сточных вод. Для подтверждения коагуляционных свойств необходимо провести jar-тесты на модельной и реальной воде с варьированием дозы реагента, pH, температуры, скорости быстрого и медленного

перемешивания и времени отстаивания. Следует определить удаление мутности, взвешенных веществ, цветности, ХПК и специфических загрязнителей, а также сопоставить результаты с коммерческим FeCl_3 .

Кроме того, требуется выполнить не менее трёх параллельных опытов для каждого режима, представить средние значения и стандартные отклонения, оценить стабильность реагента при хранении, коррозионную активность, состав нерастворимого остатка и провести технико-экономический расчёт с учётом расхода кислоты, нейтрализации и обращения с отходами.

Заключение

1. При фиксированных условиях - концентрации HCl 32 %, температуре 25°C, скорости перемешивания 200 об/мин и размере частиц 0,25 мм - увеличение продолжительности кислотного разложения с 30 до 120 мин повышает содержание FeCl_3 во всех исследованных сериях.

2. Максимальная массовая доля FeCl_3 составила 39,61 % при соотношении руда: HCl = 1:1 и продолжительности 120 мин. При соотношении 1:2 получено 38,49 % FeCl_3 при более низком остаточном содержании Fe_2O_3 - 4,38 %. Соотношение 1:3 характеризовалось избыточной остаточной кислотностью и снижением концентрации FeCl_3 до 36,83 %.

3. Плотность полученных растворов находилась в диапазоне 1,128-1,175 г/см³, динамическая вязкость - 1,55-1,92 мПа·с. Эти показатели позволяют рассматривать продукт как жидкий железосодержащий реагент, пригодный для дальнейших технологических испытаний.

4. Вывод об эффективности очистки промышленных сточных вод на основании проведённых опытов делать нельзя, поскольку коагуляционные испытания не выполнялись. Практическая применимость полученного раствора должна быть подтверждена отдельными jar-тестами, статистической оценкой воспроизводимости, исследованием стабильности при хранении и сравнением с промышленным хлоридом железа(III).

Список литературы

1. A. Knap-Ba. Knap-Bałdyga, A. Natural organic matter removal in surface water treatment via coagulation – current issues, potential solutions, and new findings // Sustainability. – 2023. – Т. 15. – DOI: 10.3390/su151813853.
2. Almeida, V.O. Production of a ferric chloride coagulant by leaching an iron ore tailing / V.O. Almeida, I.A. H. Schneider // Minerals Engineering. – 2020. – Т. 156. – DOI: 10.1016/j.mineng.2020.106511.
3. El Ouadrhiri, F. From mineral salts to smart hybrids: coagulation–flocculation at the nexus of water, energy, and resources – A critical review / F. El Ouadrhiri [et al.] // Processes. – 2025. – Т. 13. – DOI: 10.3390/pr13113405.
4. Gao, J. High-efficiency leaching of Al and Fe from fly ash for preparation of polymeric aluminum ferric chloride sulfate coagulant for wastewater treatment / J. Gao, B. Wang, W. Li, L. Cui, Y. Guo, F. Cheng // Separation and Purification Technology. – 2023. – Т. 306. – DOI: 10.1016/j.seppur.2022.122545.

5. Gkotsis, P. A novel process for the on-site preparation and application of polyferric chloride (PFC) for surface water treatment / P. Gkotsis, M. Mitrakas, A. Zouboulis // *Sustainability*. – 2023. – Т. 15. – DOI: 10.3390/su152316416.
6. Hadadi, A. Comparison of four plant-based bio-coagulants performances against alum and ferric chloride in the turbidity improvement of bentonite synthetic water / A. Hadadi [et al.] // *Water*. – 2022. – Т. 14. – DOI: 10.3390/w14203324.
7. Inam, M.A. Competitive removal of antimony and humic acid by ferric chloride: optimization of coagulation process using response surface methodology / M.A. Inam, R. Khan, K.H. Lee, Z.B. Babar, I.T. Yeom // *Water*. – 2023. – Т. 15. – DOI: 10.3390/w15091676.
8. Kong, D. Acid leaching extraction mechanism of aluminum and iron ions from coal gangue calcined powder / D. Kong [et al.] // *Materials*. – 2023. – Т. 16. – DOI: 10.3390/ma16020499.
9. Lucas, M.S. Industrial wastewater treatment by coagulation–flocculation and advanced oxidation processes: A review / M.S. Lucas [et al.] // *Water*. – 1934. – Т. 17. – DOI: 10.3390/w17131934.
10. Matveeva, V.A. Iron ore tailings as a raw material for Fe-Al coagulant production / V.A. Matveeva, M.A. Chukaeva, A.I. Semenova // *Journal of Mining Institute*. – 2024. – Т. 267. – P. 433–443.
11. Pan, H. Coal gasification crude slag based complex flocculants by two-step acid leaching process: synthesis, flocculation and mechanisms / H. Pan, C. Sun, T. Shen, J. Sun, S. He, T. Li, X. Lu // *RSC Advances*. – 2024. – Т. 14. – P. 2705–2719. – DOI: 10.1039/D3RA07232K.
12. Solmaz, A. Green industry work: production of FeCl_3 from iron and steel industry waste (mill scale) and its use in wastewater treatment / A. Solmaz, Ö. S. Bölükbaşı, Z.A. Sarı // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2024. – Т. 31. – P. 19795–19814. – DOI: 10.1007/s11356-024-32451-6.

Статья поступила в редакцию: 03.06.2026

Статья принята к публикации: 18.06.2026

Статья опубликована: 28.08.2026

УДК 665.6+543.42

Изменения нефтэмульсии месторождения «Совлигор» по данным ИК-спектроскопии после обработки деэмульгатором

Негматов Сайибжан Садыкович

акад. АН РУз, Заслуженный деятель науки Республики Узбекистан, научный руководитель
Государственного учреждения Фан ва тараккиёт Ташкентский государственный
технический университет

Республика Узбекистан, г. Ташкент

Исмаилов Равшан Исраилович

д-р хим. наук, проф.

Ташкентский государственный технический университет

Республика Узбекистан, г. Ташкент

Негматова Комила Сайибжановна

д-р техн. наук, проф.

Государственного учреждения Фан ва тараккиёт Ташкентский государственный
технический университет

Республика Узбекистан, г. Ташкент

E-mail: fan_va_taraqiyot@mail.ru

Раупова Дилфуза Нуруллаевна

науч. сотр., PhD

Государственного учреждения Фан ва тараккиёт Ташкентский государственный
технический университет

Республика Узбекистан, г. Ташкент

Мусабеков Дилишод Хакимович

науч. сотр., PhD

Государственного учреждения Фан ва тараккиёт Ташкентский государственный
технический университет

Республика Узбекистан, г. Ташкент

Рахимов Хуришид Юлдашевич

ст. науч. сотр., PhD

Государственного учреждения Фан ва тараккиёт Ташкентский государственный
технический университет

Республика Узбекистан, г. Ташкент

Changes in the oil emulsion of the Sovligor field according to IR spectroscopy data after treatment with a demulsifier

Negmatov Sayibjan

*Academician of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Honored Scientist of the Republic of Uzbekistan, Scientific Supervisor, State Institution Fan va Tarakkiyot Tashkent State Technical University
Republic of Uzbekistan, Tashkent*

Ismailov Ravshan

*doctor of Chemical Sciences, Professor
Tashkent State Technical University
Republic of Uzbekistan, Tashkent*

Negmatova Komila

*doctor of Technical Sciences, Professor
State Institution Fan va Tarakkiyot, Tashkent State Technical University
Republic of Uzbekistan, Tashkent*

Raupova Dilfuza

*Researcher, PhD
State Institution Fan va Tarakkiyot, Tashkent State Technical University
Republic of Uzbekistan, Tashkent*

Musabekov Dilshod

*Researcher, PhD
State Institution Fan va Tarakkiyot, Tashkent State Technical University
Republic of Uzbekistan, Tashkent*

Rahimov Khurshid

*Senior Researcher, PhD
State Institution Fan va Tarakkiyot, Tashkent State Technical University
Republic of Uzbekistan, Tashkent*

Аннотация

В работе представлены результаты изучения изменений структуры нефтеэмульсии месторождения «Совлигор» методом инфракрасной (ИК) спектроскопии после обработки разработанным композиционным деэмульгатором. Исходные спектры нефтеэмульсии содержат полосы поглощения, характерные для углеводородных систем, что подтверждает наличие длинных метиленовых цепочек, метильных и изопропильных групп, а также нафтеновых и ароматических структур с различной степенью замещения. После введения деэмульгатора наблюдаются изменения в интенсивности и положении отдельных полос, что свидетельствует о разрушении межфазных пленок и снижении устойчивости эмульсионной системы. ИК-спектроскопия показала, что применение композиционного деэмульгатора способствует дестабилизации водонефтяной эмульсии, облегчает процесс разделения фаз и повышает эффективность подготовки нефти к транспортировке и переработке. Полученные данные подтверждают перспективность использования данного реагента в промышленных условиях месторождения «Совлигор». Эффективность деэмульгатора существенно зависит от условий образования и свойств обрабатываемой водонефтяной эмульсии. Для снижения расхода деэмульгатора и повышение эффективности его действия необходим

Библиографическое описание: Изменения нефтеэмульсии месторождения «Совлигор» по данным ИК-спектроскопии после обработки деэмульгатором // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Негматов С.С. [и др.]. 2026. 8(149). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23052>

индивидуальный подбор деэмульгатора для каждого типа эмульсии и конкретные условия его применения. Таким образом, деэмульгаторы удовлетворяют большинству предъявляемых требований, но, обладая ещё и хорошими моющими свойствами, эти ПАВ смывают со стенок труб и оборудования нефтяные плёнки и обнажают поверхность металла для контакта с корродирующими веществами.

Abstract

The study presents the results of investigating structural changes in the oil emulsion of the Sovligor field using infrared (IR) spectroscopy after treatment with a developed composite demulsifier. The initial spectra of the oil emulsion contain absorption bands characteristic of hydrocarbon systems, confirming the presence of long methylene chains, methyl and isopropyl groups, as well as naphthenic and aromatic structures with varying degrees of substitution. After the introduction of the demulsifier, changes in the intensity and position of certain bands were observed, indicating the destruction of interfacial films and a reduction in the stability of the emulsion system. IR spectroscopy demonstrated that the application of the composite demulsifier promotes destabilization of the water–oil emulsion, facilitates phase separation, and increases the efficiency of oil preparation for transportation and refining. The obtained data confirm the potential of this reagent for use under field conditions at the Sovligor deposit. The effectiveness of the demulsifier significantly depends on the conditions of emulsion formation and the properties of the treated water–oil system. To reduce reagent consumption and enhance its efficiency, an individual selection of the demulsifier is required for each type of emulsion and specific application conditions. Thus, demulsifiers meet most of the operational requirements; however, due to their strong detergent properties, these surfactants also wash oil films from the walls of pipelines and equipment, exposing the metal surface to contact with corrosive agents.

Ключевые слова: нефтеэмульсия, месторождение «Совлигор», ИК-спектроскопия, композиционный деэмульгатор, межфазные взаимодействия, разрушение эмульсии.

Keywords: oil emulsion, Sovligor field, IR spectroscopy, composite demulsifier, interfacial interactions, emulsion breakdown.

Введение

Нефтяная промышленность занимает ключевое место в мировой экономике, определяя стратегическое развитие ряда стран. Модернизация нефтеперерабатывающей и нефтехимической отраслей тесно связана с совершенствованием технологий переработки углеводородного сырья, внедрением инновационных процессов, направленных на повышение эффективности, ресурсосбережение и улучшение качества продукции. Важным этапом подготовки нефти является удаление воды, солей и примесей, препятствующих стабильной переработке. В этой связи актуальной задачей остаётся разработка эффективных химических реагентов для обессоливания и обезвоживания нефтеэмульсий, а также внедрение энергосберегающих и экологически безопасных технологий первичной переработки [6, 2].

Деэмульгаторы — химические реагенты, применяемые для разрушения нефтяных эмульсий, возникающих при добыче и транспортировке нефти. Они способствуют ускоренному отделению воды, снижению вязкости, предотвращению коррозии и загрязнений, улучшая качество товарной нефти [1].

Особую сложность представляет разделение эмульсий с высоким содержанием природных эмульгаторов (смола, асфальтенов, парафинов) и механических примесей. Эффективным решением является разработка реагентов, адаптированных к составу нетрадиционных нефтей [4, 7].

Наибольшее распространение получили неионогенные ПАВ благодаря низкому расходу (5–60 г/т), хорошей растворимости, устойчивости к солям и кислотам и отсутствию осадков. Они также не способствуют образованию эмульсий «нефть в воде», снижая загрязнение сточных вод [3, 10, 8].

В республике по развитию нефтеперерабатывающей отрасли принимается ряд мер, направленных на повышение эффективности нефтепереработки и качества нефтепродуктов. Однако разработка и создание эффективных методов очистки и технологий экстракции в соответствии с технологическими стандартами является актуальной проблемой для республики.

Исходя из этих целей, одной из актуальных задач на сегодня является разработка альтернативных условий технологических процессов производства высококачественных нефтепродуктов – разработка новых эффективных композиционных химических реагентов – деэмульгаторов на основе местного сырья и промышленных отходов для обессоливания и обезвоживания сырой нефти.

Объекты и методики исследования. Объектами исследования являются многоатомные спирты (глицерин), карбамид, ПАВ и спиртовые отходы.

В работе содержание ароматических, парафиновых и нафтеновых структур определяли по ИК-спектрам в лаборатории «Центр передовых технологий Республики Узбекистан», с коэффициентами поглощения при 1600 и 2850 см⁻¹, которые регистрировали на спектрофотометре, модель IRAffinity-1S с Фурье-преобразованием сигнала производства фирмы Shimadzu (Япония).

Полученные результаты и их обсуждение. Работа по разработке композиционных химических реагентов-деэмульгаторов была выполнена в лаборатории «Механохимическая технология композитов и химических реагентов» ГУ «Фан ва тараккиёт» [5, 12].

Среди разнообразных методов изучения строения органических и неорганических соединений, в том числе нефтяного происхождения, важное место занимает метод инфракрасной спектроскопии (ИКС), основанный на поглощении, отражении и рассеивании энергии инфракрасного излучения при прохождении через вещество.

По своим возможностям метод ИК-спектроскопии почти универсален. Исследования нефтей и нефтепродуктов проводятся в ближней, средней и дальней областях ИК-спектра [11, 9].

ИК спектры нефтеэмульсии месторождения «Совлигор» содержат полосы поглощения, характерные для углеводородных систем: подтверждено присутствие длинных метиленовых цепочек, метильных, изопропильных групп, нафтеновых и ароматических структур с разной степенью замещения (рис. 1).

Как видно из анализа данных, представленных на рисунке для характеристики нефтей методом ИКС изучены следующие полосы поглощения: полоса при $726 - 741 \text{ см}^{-1}$, отвечающая деформационным маятниковым колебаниям метиленовой группы. Полоса в области $1032,94 - 1159,54 \text{ см}^{-1}$ – веерным и крутильным колебаниям CH_2 -группы.

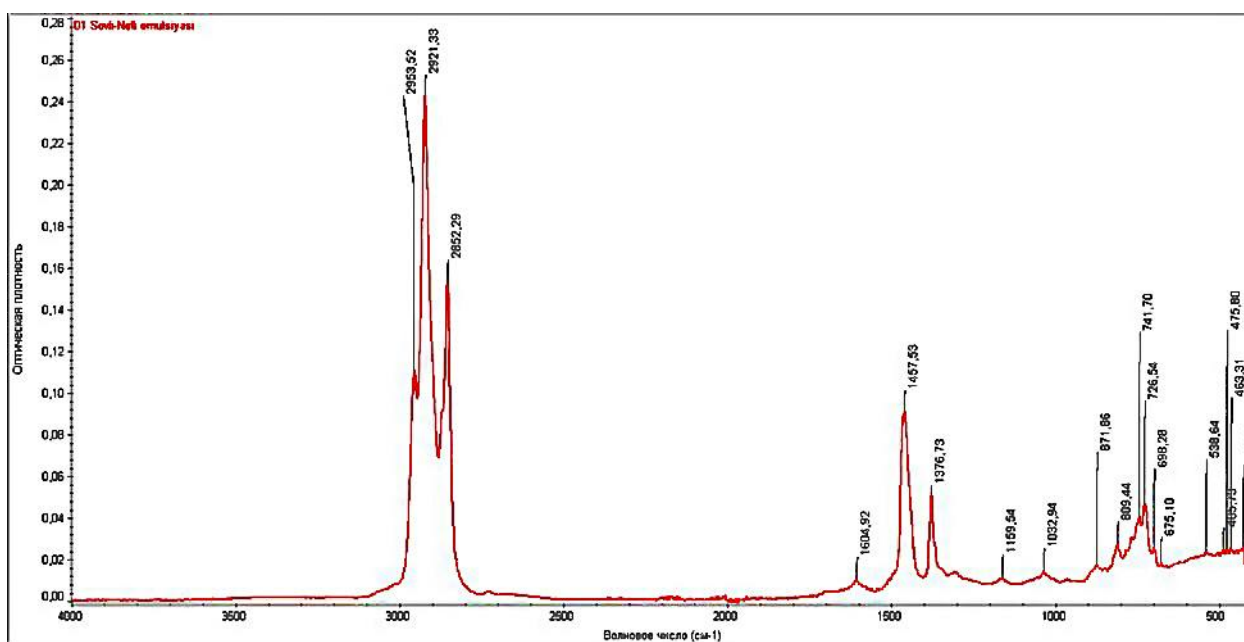


Рисунок 1. Анализ ИК-спектра нефтэмульсии месторождения «Совлигор»

Для средней молекулы оценивается содержание метиленовых групп (CH_2) по полосе поглощения $740,96 \text{ см}^{-1}$, метильных групп (CH_3) по полосе поглощения $740,96 \text{ см}^{-1}$, сульфоксидных групп (SO) по полосе поглощения $1032,24 \text{ см}^{-1}$ и ароматических соединений по полосе поглощений $1607,30, 809,44, 741,70 \text{ см}^{-1}$.

Наличие в составе свойств смолы напоминает спектры конденсированных бициклических ароматических углеводородов. Основное различие между ними заключается в поглощении кривых колебаний в спектрах смол, соответствующих требованиям групп $\text{C} = \text{O}$ и $-\text{C} - \text{O} - \text{C} -$.

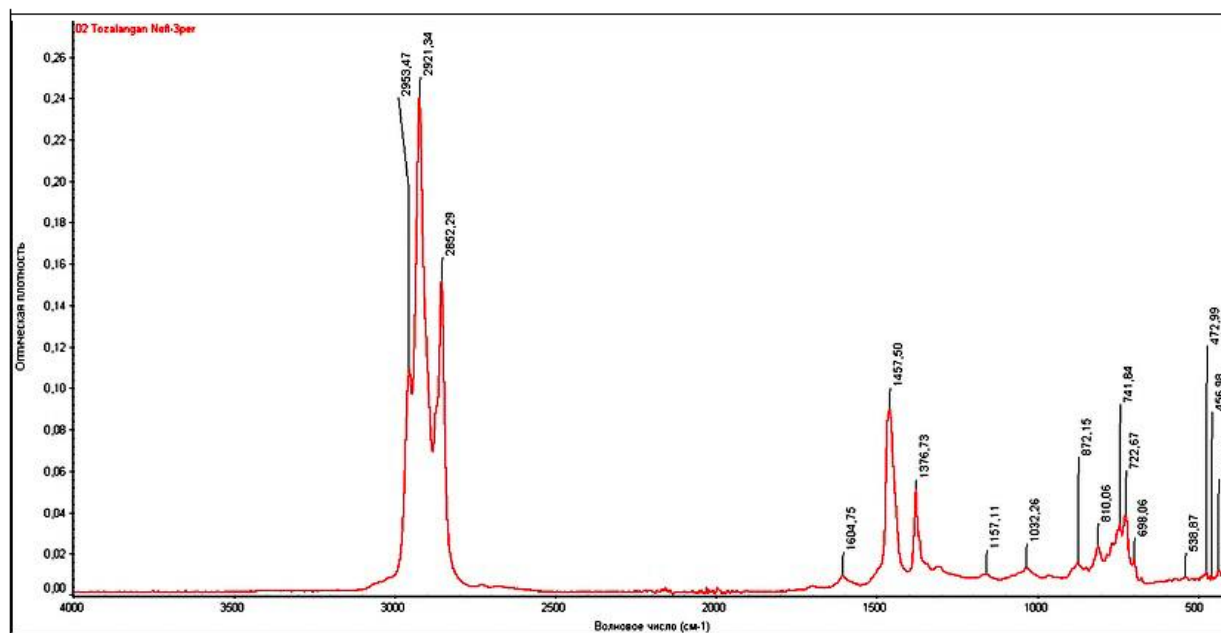


Рисунок 2. Анализ ИК-спектра очищенной нефти с разработанным композиционным деэмульгатором

Используя анализ ИК-спектра нефтеэмульсии, извлеченного из природной нефти, сильные линии поглощения при 2922 см^{-1} и 2853 см^{-1} можно различить по симметричным и антисимметричным колебаниям в соответствии с группой CH_2 .

Поглощение линий 1461 см^{-1} , 1376 см^{-1} и 749 см^{-1} относится к колебаниям длинных парафиновых цепей $\text{CH}_2\text{-CH}_2$ и относится к метиленовой группе 1467 см^{-1} , при 1461 см^{-1} к метильной группе.

Анализ ИК-спектра выявляет не только разницу в парафинах, циклопарафинах и тяжелых комплексных углеводородах, но и в менее значимой группе асфальтеновых углеводородов (рис. 3.).

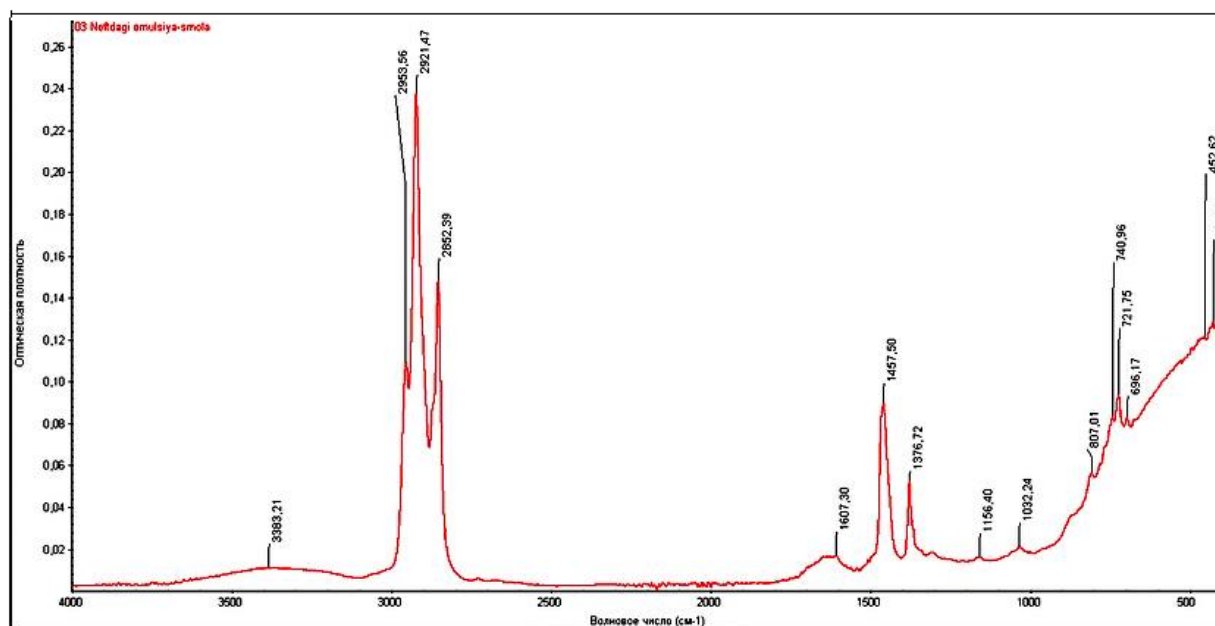


Рисунок 3. Анализ ИК-спектра твердых углеводородов нефтеэмульсии месторождения «Совлигор»

Основой вышеуказанных различий является линейное поглощение конденсированных углеводородов с линией $1032,94\text{ см}^{-1}$, а интенсивность триплета $807,01 - 452,62\text{ см}^{-1}$ отчетливо наблюдается в ИК-спектре композиции (рис. 3.). Присутствие неразветвленных парафиновых структур доказывалось сильными полосами поглощения при $807,01$ и $1457,50\text{ см}^{-1}$. Согласно сложной химической группе, анализ ИК-спектра нефтеэмульсии, привел к поглощению линий при $1376,72 - 1607,30\text{ см}^{-1}$, которые включали парафин, полициклические ароматические углеводороды, смолы и асфальтены. Их результаты характеризуют $\text{C} = \text{O}$ карбонильные группы кислот, содержащихся в ароматических кислотах. Структура этих групп показывает, что в формировании дисперсионной фазы происходят сложные химические изменения.

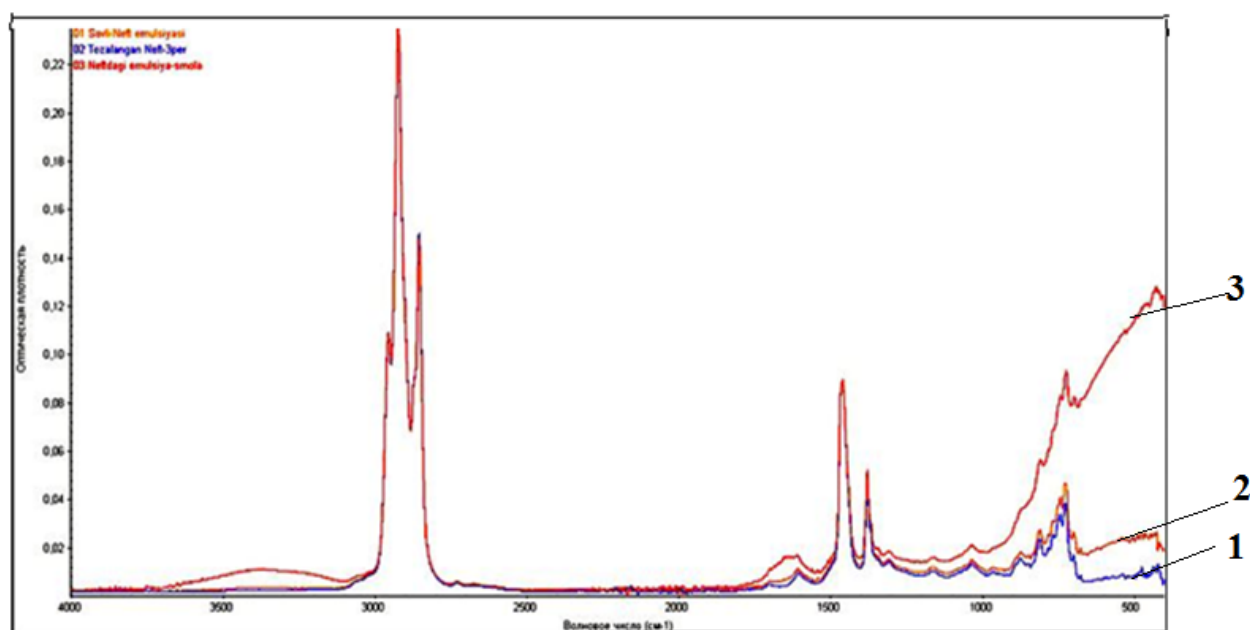


Рисунок 4. Появление изменений нефтяной эмульсии после обработки разработанным композиционным деэмульгатором в ИК-спектре

1-Очищенный нефть; 2-нефтеэмульсия; 3-эмульсионный слой нефти

Спектральные коэффициенты, являющиеся отношением оптических плотностей полос поглощения на частотах $1710, 1600, 1380$ и 720 см^{-1} , использованы при определении изменения углеводородного и структурно-группового состава остаточных нефтей, извлекаемых экстракцией из нефтесодержащих пород, что позволило в совокупности с другими данными оценить вклады влияния таких основных факторов, как окисление нефти закачиваемой водой, изменение минерального состава породы, определяющих качественный состав остаточных нефтей в неоднородных терригенных пластах.

ИК-спектры нефтеэмульсии месторождения «Совлигор» демонстрируют характерные полосы поглощения, присущие углеводородным системам. Анализ спектров позволил подтвердить наличие следующих структурных фрагментов:

Длинные метиленовые цепочки ($-\text{CH}_2-$) — свидетельствуют о присутствии парафиновых компонентов, формирующих основу углеводородной матрицы.

Метильные группы ($-\text{CH}_3$) — указывают на наличие алканов и боковых заместителей в структуре углеводородов.

Изопропильные группы — отражают присутствие разветвлённых углеводов, что влияет на физико-химические свойства нефти.

Нафтенновые циклы — подтверждают наличие циклоалканов, которые повышают плотность и вязкость нефти.

Ароматические структуры с различной степенью замещения — свидетельствуют о сложной композиции углеводов, включающей бензольные ядра и их производные.

Заключение

ИК-спектроскопия подтвердила сложный состав нефтэмульсии, включающий парафиновые, нафтенновые и ароматические компоненты. Наличие разнообразных функциональных групп указывает на высокую структурную неоднородность системы. Полученные данные позволяют оценить устойчивость эмульсии и прогнозировать её поведение при обработке деэмульгаторами. Метод ИК-спектроскопии доказал свою информативность для анализа межфазных взаимодействий и структурных особенностей углеводородных систем.

Таким образом, спектральный анализ нефтэмульсии месторождения «Совлигор» даёт полное представление о её молекулярной структуре и подтверждает наличие широкого спектра углеводородных соединений, что имеет важное значение для выбора оптимальных методов деэмульсации и подготовки нефти к переработке.

Список литературы

1. Аль-Обайди, Адель Шариф Хамади. Деэмульгаторы для подготовки тяжелых нефтей: дис. ... канд. техн. наук / Аль-Обайди Адель Шариф Хамади. – Казань. – 2004. – 171 с.
2. Башкирцева, Н.Ю. Композиции на основе неионогенных ПАВ для комплексного решения задач повышения нефтеотдачи, подготовки и транспортирования высоковязких нефтей: дис. ... д-ра техн. наук: 02.00.13 / Башкирцева Наталья Юрьевна. – Казань: КГТУ. – 2009. – 360 с.
3. Виноградов, В.М. Образование, свойства и методы разрушения нефтяных эмульсий: метод. указ. / В.М. Виноградов, В.А. Винокуров. – Москва: ФГУП «Нефть и газ»; РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина. – 2007. – 31 с.
4. Леонтьева, А.И. Формирование структуры водонефтяных эмульсий / А.И. Леонтьева, Н.Н. Балабаева, К.В. Брянкин [и др.] // Вестник ТГТУ. – 2017. – № 4. – С. 635–637.
5. Негматов, С.С. Анализ результатов, полученных по существующим технологиям, с целью разработки технологических процессов и режимов обезвоживания масла, отделения механических смесей и металлических примесей / С.С. Негматов, К.С. Негматова, Ю.К. Рахимов [и др.] // Композиционные материалы. – 2023. – № 1. – С. 229–230.
6. Очилов, А.А. Процесс разрушения устойчивых эмульсий местных нефтей с деэмульгатором / А.А. Очилов, М.А. Кудратов. – Бухара: Изд-во Бухарского инженерно-технологического института, 2014. – Т. 2. – 278 с.

7. Пулатов, Б.А. Исследование новых композиционных деэмульгаторов при обезвоживании нефти / Б.А. Пулатов, Л.Д. Смирнова, О.Э. Курбанбаева, Р.Р. Махкамов // *Узбекский химический журнал*. – 2005. – № 5. – С. 3–7.
8. Ситдикова, С.Р. Применение химических реагентов для совершенствования процессов подготовки нефти: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Уфа. – 2003. – 23 с.
9. Тарасевич, Б.Н. ИК-спектры основных классов органических соединений: справ. материалы / Б.Н. Тарасевич. – Москва. – 2012. – 55 с.
10. Фахретдинов, Р.Р. Совершенствование технологии предварительного обезвоживания нефти // *Тр. Башнипинефть*. – 2001. – С. 157–162.
11. Халиуллин, Ф.А. Инфракрасная спектроскопия в фармацевтическом анализе: учеб. пособие / Ф.А. Халиуллин, А.Р. Валиева, В.А. Катаев. – 160 с.
12. Negmatov, S.S. Investigation of the physicochemical properties of the developed composite demulsifier based on local and secondary raw materials for the destruction of oil emulsion / S.S. Negmatov, N.S. Abed, K.S. Negmatova [et al.] // *PPOR*. – 2024. – T. 25, № 1. – P. 207–216. – DOI: 10.62972/1726–4685.2024.1.207.

References

1. Al-Obaidi A.S.H. Al-Obaidi Adel Sharif Hamadi. Al-Obaidi Adel Sharif Hamadi. Demulsifiers for the preparation of heavy oils. Candidate of Technical Sciences Dissertation. Kazan, 2004, Kazan. – Kazan, 2004. – 171 P.
2. Bashkirtseva N.Yu. Compositions based on nonionic surfactants for complex solutions to enhance oil recovery, preparation, and transportation of high-viscosity oils. Doctor of Technical Sciences Dissertation: 02.00.13. – Kazan: KSTU, 2009. – 360 P.
3. Vinogradov V.M., Vinokurov V.A. Formation, properties, and methods of destruction of oil emulsions: Methodological guidelines. – Moscow: FSUE “Oil and Gas”, Gubkin Russian State University of Oil and Gas, 2007. – 31 P.
4. Leontyeva A.I., Balabaeva N.N., Bryankin K.V. et al. Formation of the structure of water-oil emulsions // *Bulletin of TSTU*. – 2017. – № 4.
5. Negmatov S.S., Negmatova K.S., Rakhimov Yu.K., Raupova D.N., Ikramova M.E., Rakhimov H.Yu., Musabekov D.Kh. Analysis of results obtained from existing technologies for the development of technological processes and regimes of oil dehydration, separation of mechanical mixtures and metallic impurities. *Composite Materials*, No. 1, 2023, P. 229–230.
6. Ochilov A.A., Kudratov M.A. Process of destruction of stable emulsions of local oils with demulsifier. Bukhara: Publishing House of Bukhara Engineering-Technological Institute, 2014, Vol. 2, 278 P.
7. Pulatov B.A., Smirnova L.D., Kurbanbaeva O.E., Makhkamov R.R. Study of new composite demulsifiers in oil dehydration. *Uzbek Chemical Journal*, 2005, No. 5, P. 3–7.
8. Sitdikova S.R. Application of chemical reagents for improving oil preparation processes. Abstract of Candidate of Technical Sciences Dissertation. Ufa. – 2003. – 23 P.

9. Tarasevich B.N. IR Spectra of the Main Classes of Organic Compounds. Reference Materials. Moscow. – 2012. – 55 P.
10. Fakhretdinov R.R. Improvement of technology for preliminary oil dehydration // Proceedings of Bashnipeft,. – 2001.
11. Khaliullin F.A., Valieva A.R., Kataev V.A. Infrared Spectroscopy in Pharmaceutical Analysis. Textbook. – 160 P.
12. Negmatov S.S., Abed N.S., Negmatova K.S., Raupova D.N., Rakhimov H.Y., Tulyaganova V.S., Yulchieva S.B. Investigation of the physicochemical properties of the developed composite demulsifier based on local and secondary raw materials for the destruction of oil emulsion. PPOR,, – P. 207–216 – 2024. – Т. 25, № 1. – URL: <https://doi.org/> (дата обращения: 03.06.2026).

Статья поступила в редакцию: 13.08.2026

Статья принята к публикации: 18.08.2026

Статья опубликована: 28.08.2026

УДК 631.86:553.97:661.183

Жидкофазная экстракция гуминовых и фульвокислот из сапропеля, отобранного на высохшем дне Аральского моря, раствором гидроксида калия

Рашитова Шахноза Шухрат кизи

преподаватель

кафедры общенаучных дисциплин, Азиатский международный университет

Республика Узбекистан, г. Бухара

E-mail: rashitovashahnozashuhratqizi@oxi.uz

Амонова Матлуба Мухтаровна

DSc, доц., Бухарский университет инновационного образования и медицины

Республика Узбекистан, г. Бухара

E-mail: matlubamuxtarovna1988@gmail.com

Liquid-phase extraction of humic and fulvic acids from sapropel collected from the dried bed of the Aral sea using potassium hydroxide solution

Shakhnoza Shukhrat kizi Rashitova

lecturer

Department of General Sciences, Asia International University

Uzbekistan, Bukhara

Amonova Matluba Mukhtarovna

DSc, Associate Professor

Bukhara University of Innovative Education and Medicine

Uzbekistan, Bukhara

Аннотация

Сапропель, отобранный на высохшем дне Аральского моря, представляет собой ценное органоминеральное сырьё, гуминовые и фульвокислоты которого могут служить основой для производства жидких органоминеральных удобрений. Цель работы — оптимизировать щелочную экстракцию гуминовых и фульвокислот из сапропеля, отобранного на высохшем дне Аральского моря, раствором КОН и обосновать рациональный технологический режим получения жидкого органоминерального удобрения. Методы исследования: щелочную экстракцию проводили при концентрации КОН 1, 2 и 3 %, температуре 40–90 °С и соотношении жидкость:твёрдое 1:1–3:1; гуминовую и фульвокислоты разделяли кислотным фракционированием, а степень их извлечения определяли гравиметрически. Для гуминовой кислоты она изменялась от 48,89 до 99,54 %, для фульвокислоты — от 44,25 до 93,57 %.

Библиографическое описание: Рашитова Ш.Ш. кизи, Амонова М.М. Жидкофазная экстракция гуминовых и фульвокислот из сапропеля, отобранного на высохшем дне Аральского моря, раствором гидроксида калия // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 8(149). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23318>

Максимальные значения получены при 3 % KOH, соотношении Ж:Т = 3:1 и температуре 90 °С. С учётом расхода реагента, воды и энергии в качестве рационального технологического режима рекомендованы 2 % KOH, Ж:Т = 2,5:1 и 80 °С; при этих условиях степень извлечения гуминовой кислоты составила 96,91 %, фульвокислоты — 90,13 %. Установлен следующий ряд влияния факторов: температура > соотношение Ж:Т > концентрация KOH. Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологии комплексной безотходной переработки аральского сапропеля с получением жидкого калий-гуматного удобрения и сорбционного материала.

Abstract

Sapropel collected from the dried bed of the Aral Sea is a valuable organomineral raw material. Its humic and fulvic acid fractions can provide a basis for liquid organomineral fertilizers. The objective of this study was to optimize the alkaline extraction of humic and fulvic acids from sapropel collected from the dried bed of the Aral Sea using KOH solution and to substantiate rational operating conditions for producing a liquid organomineral fertilizer. Methods: alkaline extraction was conducted at KOH concentrations of 1, 2, and 3 %, temperatures of 40–90 °C, and liquid-to-solid ratios of 1:1–3:1; humic and fulvic acids were separated by acid fractionation, and their extraction efficiencies were determined gravimetrically. Humic acid extraction ranged from 48.89 to 99.54 %, whereas fulvic acid extraction ranged from 44.25 to 93.57 %. The highest values were obtained with 3 % KOH at a liquid-to-solid ratio of 3:1 and 90 °C. Considering reagent, water, and energy consumption, 2 % KOH, a liquid-to-solid ratio of 2.5:1, and 80 °C were selected as the rational operating conditions. Under these conditions, humic and fulvic acid extraction reached 96.91 and 90.13 %, respectively. The relative influence of the variables followed the order temperature > liquid-to-solid ratio > KOH concentration. The results can support the development of an integrated, low-waste process for Aral Sea sapropel yielding a liquid potassium-humate fertilizer and a solid residue suitable for subsequent sorbent production.

Ключевые слова: сапропель, гуминовая кислота, фульвокислота, гидроксид калия, щелочная экстракция, Аральское море, оптимизация процесса.

Keywords: sapropel, humic acid, fulvic acid, potassium hydroxide, alkaline extraction, Aral Sea, process optimization.

Введение

Сапропель, накопившийся на обширных участках высохшего дна Аральского моря, является природным ресурсом, богатым органическими и минеральными веществами. К его наиболее ценным компонентам относятся гуминовые и фульвокислоты, способные повышать плодородие почв, стимулировать рост растений и снижать подвижность тяжёлых металлов. Поэтому переработка сапропеля с получением жидких органоминеральных удобрений представляет экологический и экономический интерес.

Сапропель представляет собой органоминеральный осадок, сформированный в течение длительного времени в результате накопления и преобразования остатков водных растений, планктона и микроорганизмов в анаэробных условиях.

Помимо гуминовых и фульвокислот, он содержит аминокислоты, витамины, микроэлементы и минеральные компоненты. Карбоксильные ($-\text{COOH}$) и фенольные гидроксильные ($-\text{OH}$) группы гуминовых веществ определяют их катионообменную ёмкость, комплексообразующую способность и участие в ионообменных процессах. В щелочной среде эти группы ионизируются, вследствие чего гуминовые и фульвокислоты переходят в раствор в форме водорастворимых гуматов и фульватов.

Наиболее распространённым способом выделения гуминовых веществ из природного сырья является щелочная экстракция с последующим кислотным фракционированием. Согласно методическим подходам Международного общества гуминовых веществ (IHSS), гуминовые вещества обычно экстрагируют разбавленным раствором щёлочи (NaOH или KOH); при последующем подкислении гуминовая кислота выпадает в осадок, а фульвокислота остаётся в растворе [1, с.1356].

Хотя гидроксид натрия широко применяется как экстрагент, при производстве удобрений предпочтителен KOH : калий является необходимым для растений макроэлементом, а образующиеся калиевые гуматы и фульваты могут непосредственно использоваться в составе жидких удобрений.

Жидкие калий-гуматные удобрения улучшают структуру почвы, повышают активность полезной микробиоты, способствуют усвоению элементов питания и устойчивости растений к стрессовым факторам. Калий дополнительно повышает агрономическую ценность таких удобрений, поскольку участвует в регуляции фотосинтеза, водного режима и ферментативной активности растений. В связи с этим щелочная экстракция гуминовых и фульвокислот из сапропеля раствором KOH является перспективным направлением получения жидкого органоминерального удобрения.

В литературе широко изучено влияние природы и концентрации щёлочи, температуры и продолжительности экстракции на выделение гуминовых кислот из лигнита, торфа, угля и сапропеля [2, с.06002; 3, с.223]. При KOH -гидротермальной обработке лигнита повышение температуры от 130 до 190 °C приводило к увеличению выхода гуминовой кислоты от 20,0 до 90,2 %. Современные исследования подтверждают эффективность щелочного извлечения гуминовых кислот из низкосортных углей и техногенного сырья [4, с.104 – 105; 5, с.2995; 6, с. 12211].

Вместе с тем после достижения определённой температуры дальнейший прирост выхода существенно замедляется. Для сапропеля Аральского моря совместное влияние концентрации щёлочи, температуры и соотношения жидкость: твёрдое на извлечение гуминовой и фульвокислот изучено недостаточно системно.

Цель работы — оптимизировать экстракцию гуминовых и фульвокислот из сапропеля, отобранного на высохшем дне Аральского моря, раствором KOH по трём основным факторам и обосновать рациональный технологический режим получения жидкого удобрения.

Материалы и методы

Объектом исследования служил образец сапропеля, отобранный на высохшем дне Аральского моря. По результатам исходного анализа содержание гуминовой кислоты в образце составляло 13,89 %, фульвокислоты — 6,84 %. Образец высушивали до воздушно-

сухого состояния, измельчали и перед экстракцией приводили к однородной дисперсности. Подход к подготовке образца и выделению гуминовых фракций согласован с опубликованными методиками [7, с. 22 – 24].

В качестве экстрагента использовали растворы КОН с концентрацией 1, 2 и 3 %. В каждом опыте сапрпель смешивали с раствором КОН при заданном соотношении жидкость:твёрдое — 1:1; 1,5:1; 2:1; 2,5:1 или 3:1 — и обрабатывали при 40, 50, 60, 70, 80 или 90 °С при постоянном перемешивании. Продолжительность обработки была одинаковой для всех образцов. После экстракции твёрдый остаток отделяли от жидкой фазы фильтрованием или центрифугированием.

Количество перешедших в жидкую фазу гуминовой и фульвокислот определяли по схеме щелочного выделения и кислотного фракционирования, применяемой в методиках IHSS [8, с.47]. Щелочной экстракт подкисляли соляной кислотой до pH 1–2: гуминовая кислота выпадала в осадок, а фульвокислота оставалась в растворе. Фракции определяли гравиметрически в пересчёте на беззольную сухую массу. Степень извлечения каждой кислоты рассчитывали как отношение её количества в экстракте к исходному содержанию в сапрпеле. Опыты выполняли в повторности; в работе приведены средние значения.

$$E = (m_{\text{экс}} / m_0) \times 100 \%, \quad (1)$$

где E — степень извлечения кислоты, %; $m_{\text{экс}}$ — масса кислоты, перешедшей в экстракт, г; m_0 — исходная масса этой кислоты в сапрпеле, г.

Диапазоны факторов выбирали с учётом литературных данных и технологических ограничений. Концентрацию щёлочи варьировали в пределах 1–3 %: более низкая концентрация не обеспечивает достаточной экстракции, а более высокая увеличивает расход реагента и может отрицательно повлиять на свойства продукта. Температуру изменяли от 40 до 90 °С. Соотношение Ж:Т повышали от 1:1 до 3:1; увеличение доли жидкой фазы способствует экстракции, но одновременно повышает затраты на последующее концентрирование раствора.

Результаты и обсуждение

Экспериментальные зависимости степени извлечения гуминовой и фульвокислот от концентрации гидроксида калия, температуры и соотношения жидкость: твёрдое представлены на рисунках 1–5.

На рисунках 1 и 2 показано влияние температуры при 2 % КОН для различных соотношений Ж:Т. При повышении температуры от 40 до 80 °С степень извлечения обеих кислот заметно возрастала. Так, при Ж:Т = 2,5:1 извлечение гуминовой кислоты увеличилось с 65,74 до 96,91 %. При переходе от 80 к 90 °С прирост существенно замедлился (96,91 → 97,69 %), то есть зависимость приблизилась к плато. Такая тенденция согласуется с литературными данными о снижении прироста эффективности экстракции после достижения определённой температуры [9, с.3658].

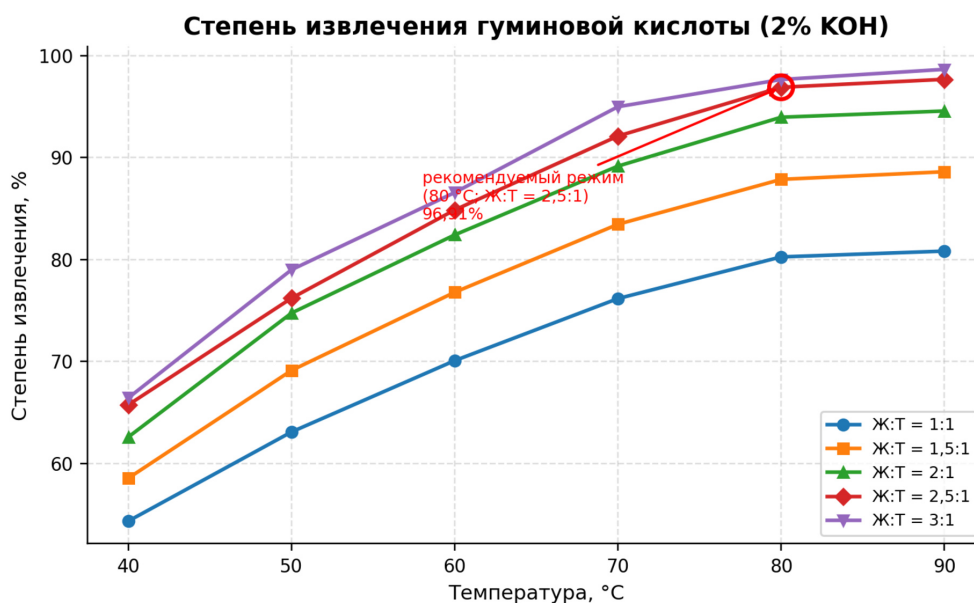


Рисунок 1. Зависимость степени извлечения гуминовой кислоты от температуры при 2 % КОН

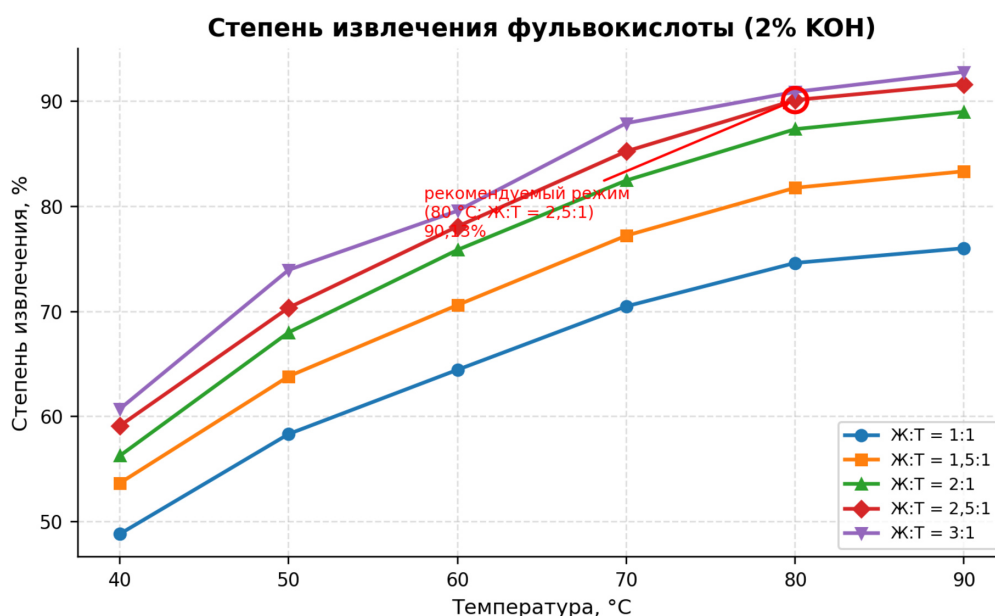


Рисунок 2. Зависимость степени извлечения фульвокислоты от температуры при 2 % КОН

На рисунке 3 представлено влияние концентрации КОН при 80 °C и Ж:Т = 2,5:1. При повышении концентрации КОН с 1 до 2 % степень извлечения гуминовой кислоты увеличилась с 94,97 до 96,91 % (на 1,94 процентного пункта), а при дальнейшем повышении до 3 % — до 97,89 % (ещё на 0,98 процентного пункта). Следовательно, увеличение концентрации щёлочи повышает извлечение, однако величина дополнительного эффекта уменьшается. Использование более 2 % КОН приводит к росту расхода реагента без пропорционального увеличения результата.

На рисунке 4 показано влияние соотношения Ж:Т при 80 °С и 2 % КОН. При его увеличении от 1:1 до 2,5:1 степень извлечения гуминовой кислоты повысилась с 80,26 до 96,91 %. Дальнейшее увеличение до 3:1 обеспечило прирост только на 0,85 процентного пункта — до 97,76 %, тогда как расход экстрагента возрос на 20 %. Для фульвокислоты наблюдалась аналогичная тенденция.

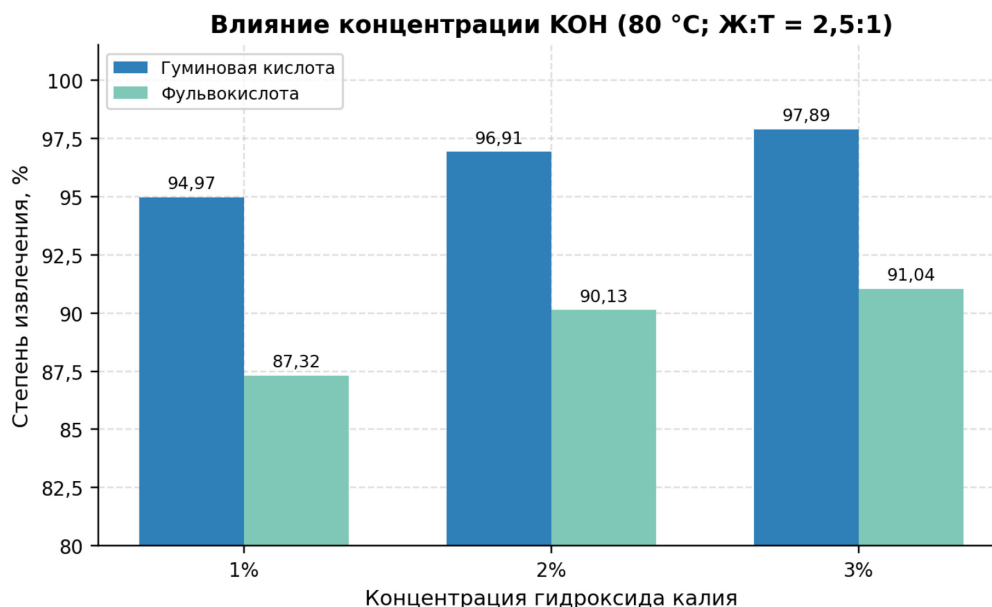


Рисунок 3. Влияние концентрации КОН на извлечение гуминовой и фульвокислот при 80 °С и Ж:Т = 2,5:1

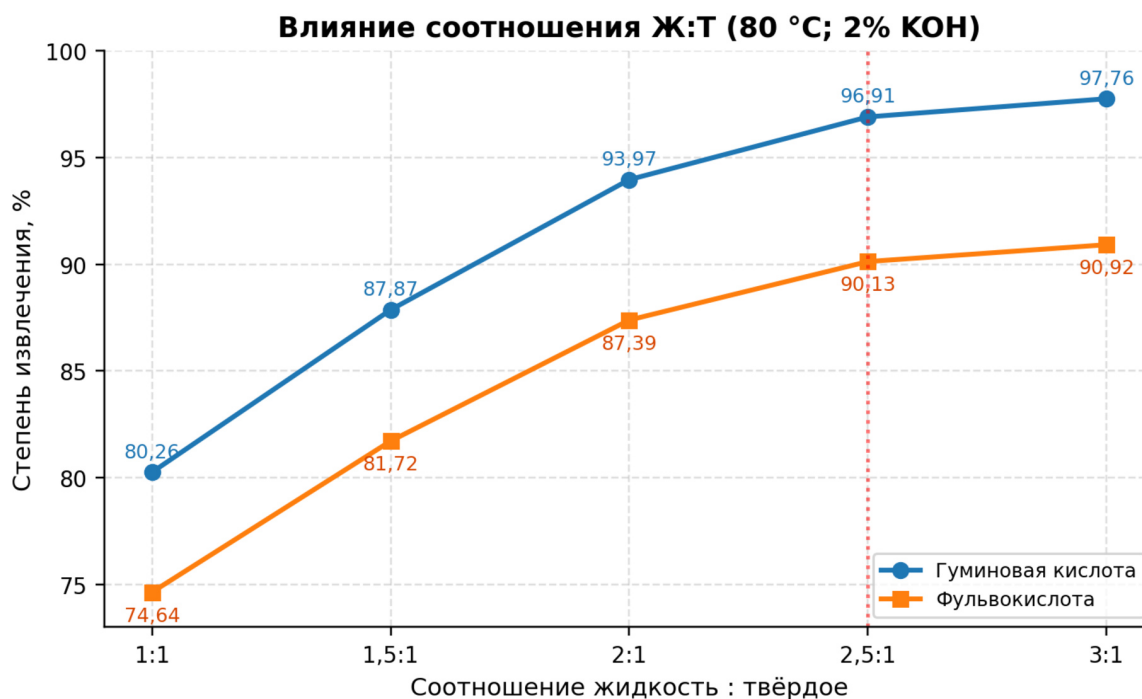


Рисунок 4. Влияние соотношения Ж:Т на извлечение гуминовой и фульвокислот при 80 °С и 2 % КОН

Во всех исследованных режимах расчётная степень извлечения гуминовой кислоты превышала соответствующее значение для фульвокислоты. Это различие может быть связано с характером связывания фракций с минеральной матрицей и особенностями их

последующего кислотного разделения и гравиметрического определения. Обе фракции одинаково направлены реагировали на изменение трёх факторов, что позволяет выбирать единый рациональный режим процесса.

Сопоставление факторов показало, что наиболее выраженное влияние оказывала температура. При 2 % КОН и Ж:Т = 2,5:1 повышение температуры от 40 до 90 °С увеличивало извлечение гуминовой кислоты примерно на 32 процентных пункта — с 65,74 до 97,69 %. Влияние соотношения Ж:Т было средним: при 2 % КОН и 80 °С его повышение от 1:1 до 3:1 увеличивало извлечение примерно на 17,5 процентного пункта — с 80,26 до 97,76 %. Влияние концентрации щёлочи было наименьшим: при 80 °С и Ж:Т = 2,5:1 её повышение от 1 до 3 % обеспечило прирост только на 2,92 процентного пункта — с 94,97 до 97,89 %. Таким образом, факторы располагались в ряду: температура > соотношение Ж:Т > концентрация КОН.

Максимальная степень извлечения получена при 3 % КОН, Ж:Т = 3:1 и 90 °С: 99,54 % для гуминовой и 93,57 % для фульвокислоты. Однако этот режим требует наибольшего расхода реагента, воды и энергии. По сравнению с выбранным рациональным режимом — 2 % КОН, Ж:Т = 2,5:1 и 80 °С — максимальный режим даёт преимущество только на 2,63 процентного пункта для гуминовой и на 3,44 процентного пункта для фульвокислоты, тогда как концентрация КОН возрастает на 50 %, а объём экстрагента и энергозатраты также увеличиваются. Поэтому в качестве технологически рационального режима приняты 2 % КОН, Ж:Т = 2,5:1 и 80 °С. При этих условиях извлечение гуминовой кислоты составляет 96,91 %, фульвокислоты — 90,13 %.

Полученные результаты согласуются с данными литературы: достижение высокой эффективности КОН-экстракции гуминовых кислот из лигнита при повышенной температуре [10,с.30923] и уменьшение дополнительного эффекта по мере роста концентрации щёлочи [11,с.1026; 12,с.38419] подтверждены и для исследованного сапропеля. Сходная технологическая целесообразность применения КОН и выбора умеренного температурного режима показана для угольного и техногенного сырья. Следовательно, раствор КОН средней концентрации, умеренное соотношение Ж:Т и температура 80 °С обеспечивают высокую степень извлечения при ограниченном расходе ресурсов.

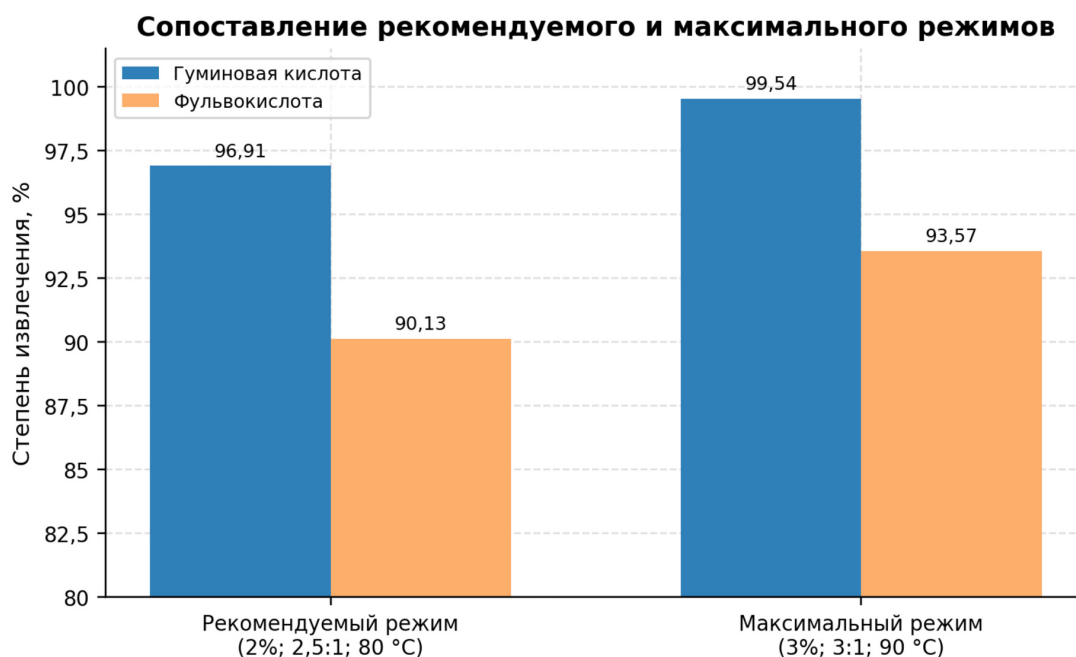


Рисунок 5. Сопоставление рационального и максимального технологических режимов

В щелочной среде карбоксильные и фенольные гидроксильные группы гуминовых и фульвокислот ионизируются, а отрицательно заряженные макромолекулы образуют с ионами калия водорастворимые гуматы и фульваты. Повышение концентрации КОН увеличивает содержание OH^- и способствует более полной ионизации функциональных групп. После исчерпания доступных ионизируемых центров дальнейшее увеличение концентрации щёлочи оказывает лишь ограниченное влияние, что объясняет уменьшающийся прирост на рисунке 3.

Повышение температуры снижает вязкость раствора, ускоряет диффузию и повышает растворимость, а также способствует ослаблению водородных связей и эфирных мостиков, удерживающих гуминовые вещества в минеральной матрице.

После 80 °C основная часть доступных гуминовых веществ уже переходит в раствор, поэтому зависимость приближается к плато. Увеличение соотношения Ж:Т снижает концентрацию растворённых веществ в жидкой фазе, поддерживает концентрационный градиент и смещает равновесие в сторону извлечения. При Ж:Т > 2,5:1 дополнительная жидкость преимущественно разбавляет экстракт, поскольку доступная часть матрицы уже почти исчерпана.

Твёрдый остаток после экстракции также представляет ценное сырьё. После промывки и сушки его можно смешивать в различных массовых соотношениях с алюмосиликатными материалами, включая золошлаковые отходы, для получения сорбентов тяжёлых металлов. Такой подход создаёт предпосылки для комплексной низкоотходной переработки сапропеля по схеме «жидкое удобрение + сорбент» и соответствует принципам циркулярной экономики.

Заключение

Системно изучено влияние концентрации КОН (1, 2 и 3 %), температуры (40–90 °С) и соотношения Ж:Т (1:1–3:1) на щелочную экстракцию гуминовой и фульвокислот из сапропеля Аральского моря. Повышение каждого из трёх факторов увеличивало степень извлечения. Для гуминовой кислоты она изменялась в пределах 48,89–99,54 %, для фульвокислоты — 44,25–93,57 %.

После достижения 80 °С, 2 % КОН и Ж:Т = 2,5:1 прирост эффективности заметно замедлялся, что соответствует физико-химическому механизму процесса.

С учётом расхода реагента, воды и энергии рациональный режим получения жидкого калий-гуматного удобрения включает 2 % КОН, Ж:Т = 2,5:1 и 80 °С. В этом режиме извлечение гуминовой кислоты составляет 96,91 %, фульвокислоты — 90,13 %. Оставшийся после экстракции твёрдый материал может быть использован совместно с золошлаковым алюмосиликатным сырьём для получения сорбентов, что создаёт основу для комплексной низкоотходной переработки сапропеля.

Список литературы

1. Cheng G., Niu Z., Zhang C., Zhang X., Li X. Extraction of humic acid from lignite by KOH-hydrothermal method // *Applied Sciences*. – 2019. – Т. 1356, № 7. – DOI: 10.3390/app9071356.
2. Deryagina M.S., Konyukhova O.M. Determination of humic acid content in sapropel // *BIO Web of Conferences*. – 2023. – DOI: 10.1051/bioconf/20236306002.
3. Garcia D., Cegarra J., Abad M., Fornes F. Effects of the extractants on the characteristics of a humic fertilizer obtained from lignite // *Bioresource Technology*. – 1993. – № 3. – DOI: 10.1016/0960-8524(93)90034-9.
4. Garcia D., Cegarra J., Roig A., Abad M. Effects of the extraction temperature on the characteristics of a humic fertilizer obtained from lignite // *Bioresource Technology*. – 1994. – № 2. – DOI: 10.1016/0960-8524(94)90106-6.
5. Jarukas L., Ivanauskas L., Kasparaviciene G., Baranauskaite J., Marksa M., Bernatoniene J. Determination of organic compounds, fulvic acid, humic acid, and humin in peat and sapropel alkaline extracts // *Molecules*. – 2021. – Т. 2995, № 10. – DOI: 10.3390/molecules26102995.
6. Li H., Ding S., Yuan J. Extraction of humic acids from lignite and its use as a biochar activator // *ACS Omega*. – 2023. – № 13. – DOI: 10.1021/acsomega.2c08192.
7. Li L., Ma L., Li Y., Wang Y., Sun S. Spectroscopic analysis of the effects of alkaline extractants on humic acids isolated from herbaceous peat // *Spectroscopy*. – 2024. – № 3.
8. Li Y., Yuan S. Influence of addition of KOH on the yield and characteristics of humic acids extracted from lignite using NaOH // *SN Applied Sciences*. – 2021. – Т. 47. – DOI: 10.1007/s42452-020-04087-x.
9. Nazarbek U., Abdurazova P., Nazarbekova S., Assylbekova D., Kambatyrov M., Raiymbekov Y. Alkaline extraction of organomineral potassium humate from coal mining waste // *Applied Sciences*. – 2022. – Т. 3658, № 7. – DOI: 10.3390/app12073658.

10. Rani J., Kumari S., Paul B. Extraction and chemical characterization of humic acid produced from lignite coals of arid region of Gujarat, Western India // Scientific Reports. – 2024. – T. 30923. – DOI: 10.1038/s41598-024-81861-6.
11. Swift R.S. Organic matter characterization // Methods of Soil Analysis. Part 3: Chemical Methods. – 1996. – DOI: 10.2136/sssabookser5.3.c35.
12. Yang Y., Li Y., Zhang Y., Wang M., Wang P., Liu D. Process condition optimization and structural feature analysis of humic acid extraction from weathered lignite // ACS Omega. – 2024. – № 37. – DOI: 10.1021/acsomega.4c01840.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

UNIVERSUM: ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Электронный научный журнал

№ 8(149)

Август 2026 г.

Часть 2

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

Мнение авторов может не совпадать с позицией редакции.

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

Издательство ООО «Юниверсум»

Объём издания: 64 с.

Минимальные системные требования: процессор с частотой от 1,3 ГГц; ОЗУ от
512 МБ; программа для чтения PDF-файлов; доступ к сети Интернет

Дата размещения в сети Интернет: 28.08.2026

Журнал размещается в:

CYBERLENINKA

e НАУЧНАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ
БИБЛИОТЕКА
LIBRARY.RU

Google
scholar

ULRICHSWEB
GLOBAL SERIALS DIRECTORY

>BASE

СОЦИОНЕТ

OpenAIRE



Registry of Open Access
Repositories (ROAR)