

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»: продолжают 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.