

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  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  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  $\text{FeCl}_3$ , остаточных  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  и  $\text{HCl}$ , 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  $\text{HCl}$  32 %, размере частиц 0,25 мм, скорости перемешивания 200 об/мин и продолжительности процесса 120 мин. При соотношении руда:  $\text{HCl}$  = 1:1 содержание  $\text{FeCl}_3$  в растворе достигло 39,61 %, плотность составила 1,135 г/см<sup>3</sup>, 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.%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  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  $\text{FeCl}_3$ , residual  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , and unreacted  $\text{HCl}$ , 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  $\text{HCl}$  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- $\text{HCl}$  ratio of 1:1, the  $\text{FeCl}_3$  content in the solution reached 39.61 wt.%, while its density and dynamic viscosity were 1.135 g/cm<sup>3</sup> 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  $\text{FeCl}_3$ , остаточной кислоты и физико-химические свойства раствора.

Цель исследования - определить влияние продолжительности кислотного разложения и массового соотношения руда: раствор  $\text{HCl}$  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 железокислотной 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  $\text{HCl}$  - 32 %. Массовое соотношение руда: раствор  $\text{HCl}$  составляло 1:1, 1:2 и 1:3. Для каждого соотношения продолжительность процесса составляла 30, 60 и 120 мин. Основную реакцию растворения железокислотной 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  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  и  $\text{HCl}$ , а также содержание  $\text{FeCl}_3$  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:  $\text{HCl}$ . 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  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  - 25,6 %, далее следуют  $\text{SiO}_2$  - 14,3 % и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  - 7,80 % (таблица 1). Наличие значимой железооксидной 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        | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | $\text{SiO}_2$ | $\text{SO}_3$ | $\text{K}_2\text{O}$ | $\text{CaO}$ | $\text{TiO}_2$ | $\text{V}_2\text{O}_5$ | $\text{MnO}$ | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | $\text{ZnO}$ | $\text{BaO}$ |
| 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:  $\text{HCl}$  = 1:1 увеличение продолжительности процесса с 30 до 120 мин сопровождалось ростом массовой доли  $\text{FeCl}_3$  с 38,59 до 39,61 % и снижением остаточного содержания  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  с 6,90 до 5,30 %. Одновременно остаточная доля  $\text{HCl}$  уменьшилась с 20,16 до 16,80 %, а плотность и вязкость раствора возросли соответственно с 1,128 до 1,135 г/см<sup>3</sup> и с 1,84 до 1,92 мПа·с.

При соотношении 1:2 содержание  $\text{FeCl}_3$  возрастало с 37,20 до 38,49 %, а остаточная доля  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  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  $\text{HCl}$  (51,47-55,76 %) и более низкая концентрация  $\text{FeCl}_3$  (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**

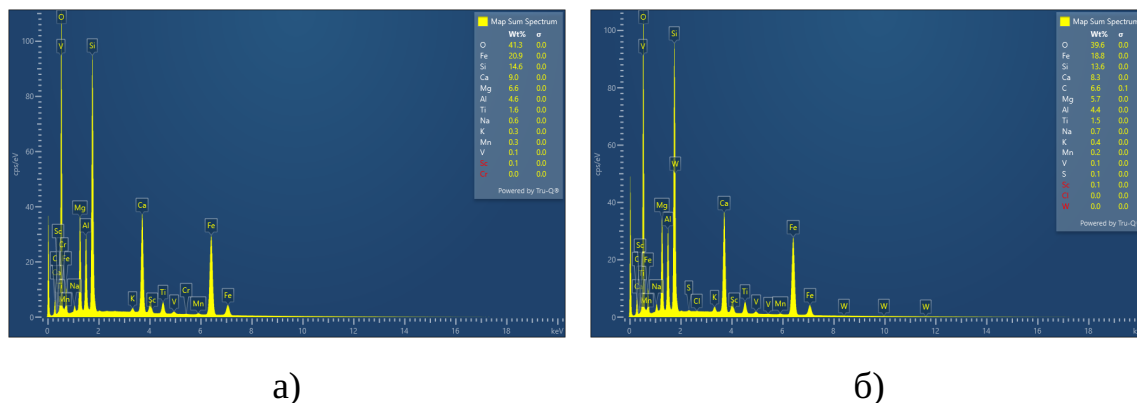
(размер частиц - 0,25 мм;  $\text{HCl}$  - 32 %; температура - 25 °С; скорость перемешивания - 200 об/мин)

| № | Время, мин | Руда : $\text{HCl}$ | Остаток : жидкая фаза | Плотность, г/см <sup>3</sup> | Вязкость, мПа·с | Остаточный $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , % | Остаточная $\text{HCl}$ , % | $\text{FeCl}_3$ , % |
|---|------------|---------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------|----------------------------------------|-----------------------------|---------------------|
| 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-<br>мя, ми<br>н | Руда :<br>HCl | Оста-<br>ток : жидкая<br>фаза | Плот-<br>ность, г/см <sup>3</sup> | Вяз-<br>кость, мПа·с | Остаточн<br>ый Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,<br>% | Остаточ-<br>ная HCl,<br>% | FeCl <sub>3</sub> , % |
|---|---------------------|---------------|-------------------------------|-----------------------------------|----------------------|------------------------------------------------------|---------------------------|-----------------------|
| 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 FeCl<sub>3</sub> наиболее результативным из исследованных режимов является соотношение 1:1 при 120 мин, при котором получено 39,61 % FeCl<sub>3</sub>. Соотношение 1:2 может рассматриваться как компромиссный режим, поскольку обеспечивает более низкое остаточное содержание Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (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  $\text{FeCl}_3$ .

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  $\text{HCl}$  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  $\text{FeCl}_3$  во всех исследованных сериях.

2. Максимальная массовая доля  $\text{FeCl}_3$  составила 39,61 % при соотношении руда:  $\text{HCl}$  = 1:1 и продолжительности 120 мин. При соотношении 1:2 получено 38,49 %  $\text{FeCl}_3$  при более низком остаточном содержании  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  - 4,38 %. Соотношение 1:3 характеризовалось избыточной остаточной кислотностью и снижением концентрации  $\text{FeCl}_3$  до 36,83 %.

3. Плотность полученных растворов находилась в диапазоне 1,128-1,175 г/см<sup>3</sup>, 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-Bałyda, 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  $\text{FeCl}_3$  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.