



УДК 628.3:541.13
doi: 10.21685/2587-7704-2025-10-2-6



Open
Access

RESEARCH
ARTICLE

Разработка лабораторного генератора ферратов для оптимизации синтеза Fe(VI): влияние рабочих параметров на выход по току

Алексей Сергеевич Балыбердин

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40
bwa7041@gmail.com

Марина Александровна Маркина

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40
marina.markina.6405@gmail.com

Софья Владимировна Буянова

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40
sofa.buynova@yandex.ru

Наталья Владленовна Камардина

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40
ot@pnzgu.ru

Владимир Николаевич Штепа

Белорусский государственный технологический университет, Беларусь, г. Минск, ул. Свердлова, 13 А
tp poles@gmail.com

Александр Валентинович Дубина

Белорусский государственный технологический университет, Беларусь, г. Минск, ул. Свердлова, 13 А
dubina@belstu.by

Аннотация. Представлен лабораторный генератор ферратов (Fe(VI)), предназначенный для изучения влияния ключевых параметров (плотность тока, pH, температура, скорость циркуляции) на эффективность синтеза Fe(VI). Установка оснащена системой регулировки рабочих режимов и адаптирована для малообъемных экспериментов (50–200 мл). Количественный анализ ферратов проводился методом спектрофотометрии при длине волны 510 нм. Экспериментально установлено, что максимальный выход по току (78 %) достигается при плотности тока 10 мА/см², pH = 12, температуре 25 °С и скорости циркуляции 0,3 л/мин. Результаты демонстрируют перспективность технологии для оптимизации промышленных процессов очистки воды.

Ключевые слова: лабораторный генератор, ферраты, синтез Fe(VI), оптимизация, рабочие параметры, выход по току

Для цитирования: Балыбердин А. С., Маркина М. А., Буянова С. В., Камардина Н. В., Штепа В. Н., Дубина А. В. Разработка лабораторного генератора ферратов для оптимизации синтеза Fe(VI): влияние рабочих параметров на выход по току // Инжиниринг и технологии. 2025. Т. 10 (2). С. 1–5. doi: 10.21685/2587-7704-2025-10-2-6

Development of a laboratory ferrate generator for optimizing Fe(VI) synthesis: the effect of operating parameters on current output

Alexey S. Balyberdin

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia
bwa7041@gmail.com

Marina A. Markina

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia
marina.markina.6405@gmail.com



Sofya V. Buyanova

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia
sofa.buynova@yandex.ru

Natalia V. Kamardina

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia
ot@pnzgu.ru

Vladimir N. Shtepa

Belarusian State Technological University, 13 A Sverdlov Street, Minsk, Belarus
tppoless@gmail.com

Alexander V. Dubina

Belarusian State Technological University, 13 A Sverdlov Street, Minsk, Belarus
dubina@belstu.by

Abstract. The article presents a laboratory ferrate generator (Fe(VI)) designed to study the effect of key parameters (current density, pH, temperature, circulation rate) on the efficiency of Fe(VI) synthesis. The unit is equipped with an operating mode control system and is adapted for low-volume experiments (50–200 ml). The quantitative analysis of ferrates was carried out by spectrophotometry at a wavelength of 510 nm. It has been experimentally established that the maximum current output (78 %) is achieved at a current density of 10 mA/cm², pH = 12, temperature of 25 °C, and a circulation rate of 0.3 l/min. The results demonstrate the promising technology for optimizing industrial water purification processes.

Keywords: laboratory generator, ferrates, Fe(VI) synthesis, optimizations, operating parameters, current efficiency

For citation: Balyberdin A.S., Markina M.A., Buyanova S.F., Kamardina N.V., Shtepa V.N., Dubina A.V. Development of a laboratory ferrate generator for optimizing Fe(VI) synthesis: the effect of operating parameters on current output. *Inzhiniring i tekhnologii = Engineering and Technology*. 2025;10(2): 1–5. (In Russ.). doi: 10.21685/2587-7704-2025-10-2-6

Введение

Электрохимический синтез ферратов (Fe(VI)) является перспективным методом очистки воды благодаря высокой окислительной способности и многофункциональности реагента. Однако нестабильность Fe(VI) требует тщательной оптимизации параметров синтеза, особенно в лабораторных условиях, где возможен детальный анализ кинетики и механизмов реакций [1]. Существующие промышленные установки часто не позволяют гибко варьировать параметры, что ограничивает исследования.

Цель работы – разработка лабораторного генератора ферратов с возможностью контроля плотности тока, температуры, pH и скорости циркуляции, а также оценка влияния этих параметров на выход Fe(VI) по току.

Теоретическое обоснование

Спектрофотометрический анализ ферратов. Концентрация Fe(VI) определялась методом УФ-спектрофотометрии по поглощению при $\lambda = 510$ нм ($\epsilon = 1150 \text{ М}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$) [2]. Калибровочная кривая строилась в диапазоне 0,5–10,0 мг/л ($R^2 = 0,998$).

Выход по току (η) рассчитывался по формуле:

$$\eta = \frac{n \cdot F \cdot C_{\text{Fe(VI)}} \cdot V}{I \cdot t} \cdot 100 \%,$$

где:

- $n = 3$ (число электронов для восстановления $\text{Fe(VI)} \rightarrow \text{Fe(III)}$);
- F – постоянная Фарадея (96485 Кл/моль);
- $C_{\text{Fe(VI)}}$ – концентрация Fe(VI) , моль/л;
- V – объем раствора, л;
- I – сила тока, А;
- t – время электролиза, с.



Конструкция генератора
Установка (рис. 1) включает:

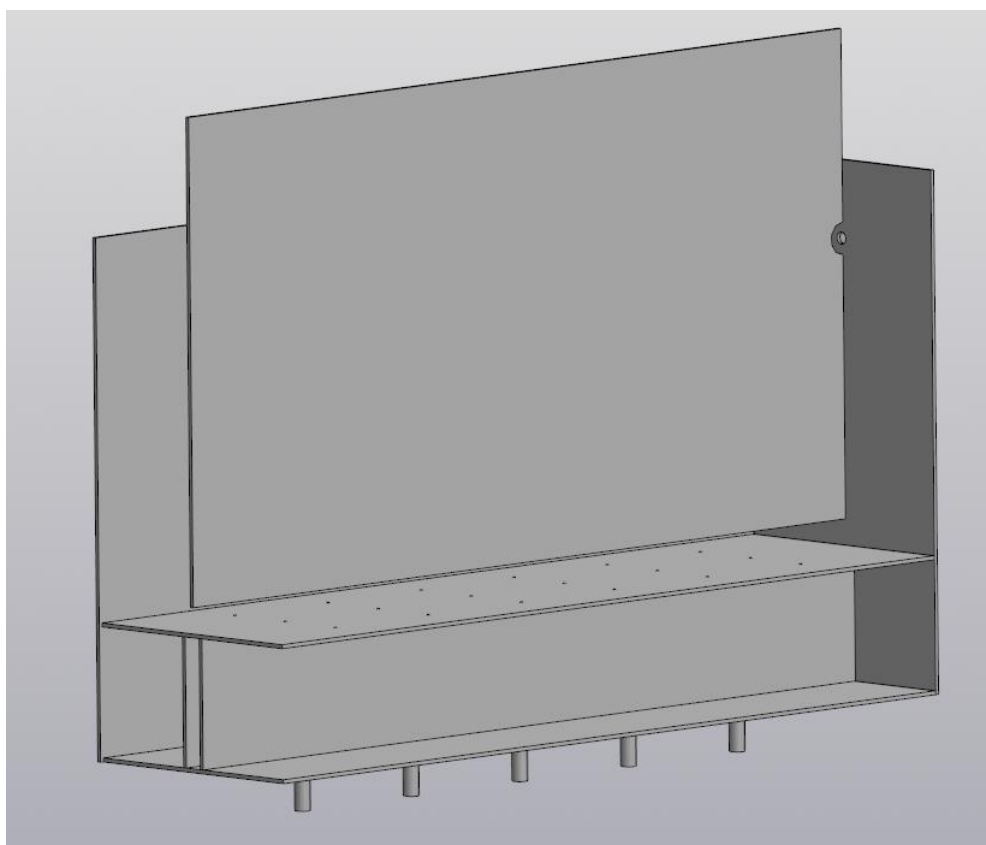


Рис. 1. Конструкция установки

- **Анодный модуль:** железная стружка (сталь Ст3, фракция 0,5–1 мм) в перфорированном пластиковом контейнере;
- **Катод:** нержавеющая сталь 08X18H10T (площадь 50 см²);
- **Электролит:** 1 М NaOH с регулируемым pH (10–13);
- **Система контроля:** источник тока (0–15 В, 0–100 мА), термостат ($\pm 0,5$ °C), перистальтический насос (0,1–1 л/мин);
- **Диафрагма:** брезентовая ткань для разделения катодного и анодного пространств.

Экспериментальные результаты

Исследования проводились при варьировании параметров:

- плотность тока: 5–20 мА/см²;
- температура: 20–40 °C;
- pH: 10–13;
- Скорость циркуляции: 0,1–0,5 л/мин.

Таблица 1

Выход Fe(VI) по току в зависимости от параметров

Плотность тока, мА/см ²	Температура, °C	pH	Скорость циркуляции, л/мин	Выход по току, %
5	25	12	0,3	65
10	25	12	0,3	78
15	25	12	0,3	62



Окончание табл. 1

Плотность тока, мА/см ²	Температура, °С	pH	Скорость циркуляции, л/мин	Выход по току, %
10	20	12	0,3	70
10	30	12	0,3	75
10	25	11	0,3	58
10	25	13	0,3	68
10	25	12	0,1	55
10	25	12	0,5	72

Максимальный выход ферратов (78 %) наблюдался при оптимальных параметрах синтеза: плотность тока – 10 мА/см², pH – 12, температура 25 °С и скорость циркуляции раствора – 0,3 л/мин. Повышение плотности тока свыше 10 мА/см² приводит к доминированию побочной реакции электрохимического выделения кислорода (O₂), что снижает эффективность синтеза Fe(VI). Кроме того, снижение pH ниже 12 уменьшает стабильность ферратов в растворе из-за ускоренного распада Fe(VI) до Fe(III), тогда как повышение pH выше 12 замедляет кинетику анодного окисления железа, что согласуется с литературными данными [3, 4]. Таким образом, поддержание заданных параметров критически важно для максимизации выхода целевого продукта.

Обсуждение

Выход по току в предлагаемой установке на 15 % выше, чем в непроточных системах с неподвижным анодом [5], что объясняется оптимизацией гидродинамики за счет циркуляции раствора. Использование брезентовой диафрагмы снизило стоимость установки без значительного ущерба эффективности.

Установка обеспечивает точный контроль параметров (плотность тока, pH, температура, скорость потока), что делает ее оптимальной для фундаментальных исследований и изучения кинетики синтеза Fe(VI) *in situ*. Это позволяет детально анализировать механизмы реакций и оптимизировать процесс очистки. Однако технология имеет ограничения, связанные с необходимостью частой замены диафрагмы при работе с растворами, содержащими высокие концентрации взвешенных частиц. Это увеличивает эксплуатационные затраты и требует дополнительного обслуживания, что может ограничивать применение установки в условиях высокоминерализованных стоков.

Заключение

Лабораторный генератор ферратов демонстрирует высокую эффективность синтеза Fe(VI) с выходом по току до 78 %, что делает его ценным инструментом для исследований, предшествующих масштабированию технологии для промышленного применения. В перспективе планируется автоматизация контроля параметров с использованием *IoT*-датчиков, что позволит повысить точность управления процессом и снизить влияние человеческого фактора. Кроме того, дальнейшие исследования будут направлены на изучение влияния примесей, таких как тяжелые металлы и органические соединения, на стабильность и эффективность Fe(VI) в различных водных средах. Эти шаги помогут адаптировать технологию для более широкого спектра задач очистки воды.

Список литературы

1. Киреев С. Ю., Штепа В. Н., Киреева С. Н. [и др.]. Исследование эффективности электрохимического синтеза ферратов // Химическая технология. 2024. Т. 25, № 2. С. 67–73. doi: 10.31044/1684-5811-2024-25-2-67-73.
2. Licht S., Naschitz V., Halperin L. [et al.]. Analysis of Ferrate(VI) Compounds // J. Power Sources. 2001. Vol. 101. P. 167–176.
3. Jiang J.Q. [et al.]. Dual Role of Ferrate(VI) // Water Res. 2016. Vol. 98. P. 102–109.



4. Kireev S. Yu., Shtepa V. N., Kireeva S. N. [et al.]. Study of the Efficiency of Using an Electrochemical Module to Generate Ferrates while Treating Wastewater from Meat Processing Plants // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2024. Vol. 58, № 2. P. 469–474. doi: 10.1134/S0040579524700775
5. Khezami L. [et al.]. Lab-Scale Electrochemical Reactors // J. Environ. Chem. Eng. 2023. Vol. 11. P. 109876.

References

1. Kireev S.Ju., Shtepa V.N., Kireeva S.N. et al. Investigation of the effectiveness of electrochemical synthesis of ferrates. *Himicheskaja tehnologija = Chemical technology*. 2024;25(2):67–73. (In Russ.). doi: 10.31044/1684-5811-2024-25-2-67-73.
2. Licht S., Naschitz V., Halperin L. et al. Analysis of Ferrate(VI) Compounds. *J. Power Sources*. 2001;101:167–176.
3. Jiang J.Q. et al. Dual Role of Ferrate(VI). *Water Res.* 2016;98:102–109.
4. Kireev S.Yu., Shtepa V.N., Kireeva S.N. et al. Study of the Efficiency of Using an Electrochemical Module to Generate Ferrates while Treating Wastewater from Meat Processing Plants. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2024;58(2):469–474. doi: 10.1134/S0040579524700775
5. Khezami L. et al. Lab-Scale Electrochemical Reactors. *J. Environ. Chem. Eng.* 2023;11:109876.

Поступила в редакцию / Received 29.04.2025

Принята к публикации / Accepted 15.05.2025