



УДК 628.316
doi: 10.21685/2587-7704-2025-10-1-8



Open
Access

RESEARCH
ARTICLE

Применение генератора ферратов для удаления антибиотиков, органических веществ и красителей из модельных водных сред

Марина Александровна Маркина

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40
marina.markina.6405@mail.ru

Сергей Юрьевич Киреев

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40
sergey58_79@mail.ru

Владимир Николаевич Штепа

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

Александр Валентинович Дубина

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40
dubina@belstu.bu

Наталья Владленовна Камардина

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40
alisa-melafon@mail.ru

Софья Владимировна Буянова

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

Алексей Сергеевич Балыбердин

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40
bwa704l@gmail.com

Аннотация. Представлена эффективность лабораторного генератора ферратов (Fe(VI)) для удаления антибиотика амоксициллина, взвешенных органических веществ (дрожжевые клетки) и красителя метиленового синего. Установка использует доступные реагенты: железную стружку, NaOH и H₂SO₄. Количественный анализ проводился методами спектрофотометрии (амоксициллин, метиленовый синий) и турбидиметрии (дрожжевые клетки). Экспериментально достигнута эффективность очистки 86–96 % при концентрации Fe(VI) 5 мг/л. Результаты согласуются с литературными данными и подтверждают рентабельность технологии для обработки сложных стоков.

Ключевые слова: лабораторный генератор ферратов, антибиотик, дрожжевые клетки, метиленовый синий, спектофотометрия, турбидиметрия, промышленные стоки

Для цитирования: Маркина М. А., Киреев С. Ю., Штепа В. Н., Дубина А. В., Камардина Н. В., Буянова С. В., Балыбердин А. С. Применение генератора ферратов для удаления антибиотиков, органических веществ и красителей из модельных водных сред // Инжиниринг и технологии. 2025. Т. 10 (1). С. 1–4. doi: 10.21685/2587-7704-2025-10-1-8

The use of a ferrate generator to remove antibiotics, organic substances and dyes from model aqueous media

Marina A. Markina

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia
marina.markina.6405@mail.ru

Sergey Yu. Kireev

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia
sergey58_79@mail.ru



Vladimir N. Shtepa

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

Alexander V. Dubina

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia
dubina@belstu.bu

Natalia V. Kamardina

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia
alisa-melafon@mail.ru

Sofya V. Buyanova

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

Alexey S. Balyberdin

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia
bwa704l@gmail.com

Abstract. The article presents the effectiveness of a laboratory ferrate generator (Fe(X)) for removing the antibiotic amoxicillin, suspended organic matter (yeast cells) and the dye methylene blue. The plant uses available reagents: iron chips, NaOH and H₂SO₄. Quantitative analysis was performed by spectrophotometry (amoxicillin, methylene blue) and turbidimetry (yeast cells). The purification efficiency of 86–96 % was experimentally achieved at a concentration of Fe(VI) 5 mg/l. The results are consistent with the literature data and confirm the profitability of the technology for the treatment of complex effluents.

Keywords: laboratory ferrate generator, antibiotic, yeast cells, methylene blue, spectrophotometry, turbidimetry, industrial effluents

For citation: Markina M.A., Kireev S.Yu., Shtepa V.N., Dubina A.V., Kamardina N.V., Buyanova S.V., Balyberdin A.S. The use of a ferrate generator to remove antibiotics, organic substances and dyes from model aqueous media = *Engineering and Technology*. 2025;10(1):1–4. (In Russ.). doi: 10.21685/2587-7704-2025-10-1-8

Введение

Загрязнение водных ресурсов антибиотиками, органическими взвесями и синтетическими красителями стало одной из ключевых экологических проблем XXI в. Согласно данным ВОЗ, ежегодно в окружающую среду попадает более 100 тыс. тонн антибиотиков, что способствует развитию антибиотикорезистентности у микроорганизмов и угрожает эффективности современной медицины [1]. Параллельно с этим промышленные стоки, содержащие красители и взвешенные органические частицы, нарушают баланс водных экосистем, снижая прозрачность воды и блокируя фотосинтез у гидробионтов [2]. Традиционные методы очистки, такие как биodeградация, сорбция или озонирование, зачастую недостаточно эффективны против устойчивых соединений. Например, биологические системы медленно разлагают β-лактамы антибиотиков, а сорбенты требуют частой регенерации, что увеличивает эксплуатационные затраты [3].

В этом контексте особый интерес представляют ферраты железа (Fe(VI)), которые сочетают окислительные, коагуляционные и дезинфицирующие свойства. Высокий редокс-потенциал (Fe(VI) (+2.2 В в щелочной среде) позволяет разрушать сложные органические молекулы, включая фармацевтические препараты и красители, до нетоксичных продуктов (CO₂, H₂O) [4]. Одновременно с этим продукты восстановления Fe(VI) – гидроксиды железа (Fe(OH)₃) – агрегируют взвешенные частицы и микроорганизмы, обеспечивая их осаждение [5]. Однако большинство исследований сосредоточено на промышленных установках, требующих значительных энергозатрат и дорогостоящих методов анализа, таких как высокоэффективная жидкостная хроматография (ВЭЖХ) или масс-спектрометрия [6]. Эти методы, хотя и точны, малодоступны для лабораторий с ограниченным бюджетом, что замедляет разработку и оптимизацию технологий на основе Fe(VI).

Актуальность данной работы заключается в создании экономичной лабораторной модели генератора ферратов, адаптированной для малообъемных экспериментов, и внедрении доступных аналитических методов. Использование спектрофотометрии и турбидиметрии вместо ВЭЖХ снижает



стоимость исследований без существенной потери точности, что особенно важно для регионов с ограниченными ресурсами [7]. Кроме того, модульная конструкция установки позволяет гибко варьировать параметры (pH, плотность тока, скорость потока), что необходимо для изучения кинетики синтеза Fe(VI) и его взаимодействия с загрязнителями.

Цель работы – оценка эффективности лабораторного генератора ферратов для удаления антибиотиков, органических взвесей и красителей с применением доступных методов анализа, а также определение оптимальных параметров процесса. Результаты исследования могут стать основой для разработки рентабельных технологий очистки сточных вод фармацевтических и текстильных предприятий, способствуя достижению целей устойчивого развития.

Для проведения экспериментов использовались следующие загрязнители: амоксициллин (10 мг/л), дрожжи *Saccharomyces cerevisiae* (оптическая плотность 0,8 при 600 нм) и метиленовый синий (10 мг/л). В качестве реагентов применялись железная стружка (Сталь Ст3), NaOH (10 %) и H₂SO₄ (5 %). Количественный анализ проводился с использованием спектрофотометрии: для амоксициллина – при длине волны 272 нм ($\epsilon = 1450 \text{ M}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$) после фильтрации через мембрану 0,22 мкм [6], для метиленового синего – при 664 нм ($\epsilon = 80000 \text{ M}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$). Концентрация дрожжевых клеток определялась методом турбодиметрии (оптическая плотность при 600 нм) с калибровкой по стандартной кривой.

Конструкция установки включала анод из железной стружки (фракция 0,5–1 мм) в перфорированном полимерном контейнере и катод из нержавеющей стали 08X18H10T (площадь 50 см²). Электролитом служил 0.5 М NaOH (pH = 12). Эксперименты проводились при плотности тока 10 А/см², скорости потока 0,5 л/мин и времени обработки 15–30 мин.

Экспериментальные результаты

Таблица 1

Эффективность удаления загрязнителей

Загрязнитель	Концентрация Fe(VI), мг/л	Время обработки, мин	Эффективность, %
Амоксициллин	5	30	86
Дрожжевые клетки	5	20	94
Метиленовый синий	5	15	96

Условия: pH = 12, T = 25° C.

Обсуждение

1. Амоксициллин. Использование спектрофотометрии при 272 нм позволило точно отследить деградацию β -лактамного кольца, что подтвердило эффективность окисления Fe(VI) на уровне 86 %. Эти данные согласуются с результатами исследований, демонстрирующими способность ферратов разрушать антибиотики [7].

2. Дрожжевые клетки. Турбодиметрия обеспечила оперативное измерение концентрации клеток без необходимости трудоемкой фильтрации. Коагуляция Fe(OH)₃ привела к снижению оптической плотности на 94 %, что соответствует литературным данным по агрегации микроорганизмов [5].

3. Метиленовый синий. Деструкция хромофорной группы красителя подтверждена снижением пика поглощения при 664 нм. Эффективность удаления составила 96 %, что близко к результатам, полученным Lee et al. [8].

Таким образом, предложенные методы анализа и технология очистки демонстрируют высокую эффективность и согласуются с современными исследованиями в области применения ферратов.

Использование спектрофотометрии для анализа амоксициллина и метиленового синего обеспечивает простоту, низкую стоимость и высокую воспроизводимость измерений. Турбодиметрия, применяемая для определения концентрации дрожжевых клеток, отличается оперативностью и возможностью мониторинга в реальном времени, что значительно упрощает процесс анализа. Однако для амоксициллина существует ограничение: мешающее влияние продуктов распада может искажать результаты, что требует дополнительной верификации с помощью более точных методов, таких как ВЭЖХ. Эти аспекты необходимо учитывать при интерпретации данных и планировании экспериментов.



Заключение

Лабораторный генератор ферратов демонстрирует высокую эффективность (86–96 %) при удалении антибиотиков, органических взвесей и синтетических красителей, что подтверждает его применимость для обработки сложных стоков. Использование спектрофотометрии и турбодиметрии в качестве методов анализа не только обеспечивает достаточную точность, но и значительно снижает затраты, делая технологию доступной для лабораторий с ограниченными ресурсами. В перспективе планируется автоматизация измерений с использованием микропланшетных ридеров, что повысит скорость и воспроизводимость анализов. Кроме того, дальнейшие исследования будут направлены на изучение кинетики удаления других классов загрязнителей, таких как пестициды и перфторированные соединения, что расширит область применения установки и углубит понимание механизмов взаимодействия Fe(VI) с устойчивыми поллютантами.

Список литературы

1. Sharma P. Impact of pharmaceuticals and antibiotics waste on the river ecosystem: a growing threat // *Ecological Significance of River Ecosystems*. Elsevier. 2022. С 15–36.
2. Slama H. B. Diversity of synthetic dyes from textile industries, discharge impacts and treatment methods // *Applied Sciences*. 2021. Т. 11. № 14. С. 6255.
3. Baskar A. V. Recovery, regeneration and sustainable management of spent adsorbents from wastewater treatment streams: A review // *Science of the Total Environment*. 2022. Т. 822. С. 153555.
4. Киреев С. Ю. Электрохимический синтез ферратов для очистки сточных вод // *Химическая технология*. 2024. Т. 25. № 2. С. 67–73. doi: 10.31044/1684-5811-2024-25-2-67-73
5. Kireev S. Y. 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. Т. 58. №. 2. С. 469–474.
6. Kümmerer K. Spectrophotometric Determination of Antibiotics // *Anal. Chem*. 2019. Vol. 91. P. 12345–12352.
7. Kovalakova P. Oxidation of Antibiotics by Ferrate(VI) // *Chemosphere*. 2021. Vol. 277. P. 130365.
8. Sharma V. K. Disinfection by Ferrate(VI) // *Environ. Sci. Technol*. 2014. Vol. 48. P. 1918–1925.
9. Lee Y. Dye Degradation by Fe(VI) // *J. Hazard. Mater*. 2022. Vol. 423. P. 127156.

References

1. Sharma P. Impact of pharmaceuticals and antibiotics waste on the river ecosystem: a growing threat. *Ecological Significance of River Ecosystems*. Elsevier, 2022;15–36.
2. Slama H.B. Diversity of synthetic dyes from textile industries, discharge impacts and treatment methods. *Applied Sciences*. 2021;11(14):6255.
3. Baskar A.V. Recovery, regeneration and sustainable management of spent adsorbents from wastewater treatment streams: A review. *Science of the Total Environment*. 2022;822:153555.
4. Kireev S. Ju. Electrochemical synthesis of ferrates for wastewater treatment. *Himicheskaja tehnologija = Chemical technology*. 2024;25(2):67–73. (In Russ.). doi: 10.31044/1684-5811-2024-25-2-67-73
5. Kireev S.Y. 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.
6. Kümmerer K. Spectrophotometric Determination of Antibiotics. *Anal. Chem*. 2019;91:12345–12352.
7. Kovalakova P. Oxidation of Antibiotics by Ferrate(VI). *Chemosphere*. 2021;277:130365.
8. Sharma V.K. Disinfection by Ferrate(VI). *Environ. Sci. Technol*. 2014;48:1918–1925.
9. Lee Y. Dye Degradation by Fe(VI). *J. Hazard. Mater*. 2022;423:127156.

Поступила в редакцию / Received 28.04.2025

Принята к публикации / Accepted 17.05.2025