

С. Ю. Киреев, В. Н. Штепа, С. Н. Киреева,
А. В. Дубин, Ю. Н. Кирилина, В. А. Крылов

ЛАБОРАТОРНЫЙ ФЕРРАТОВ: КОНСТРУКЦИЯ, РЕЖИМЫ, ЭФФЕКТИВНОСТЬ

Ключевые слова: ферраты, очистка воды, электрохимический синтез, ксенобиотики, экологическая безопасность, лабораторный генератор, эффективность очистки.

Статья посвящена разработке и оптимизации лабораторного генератора ферратов (Fe(VI)) для эффективной очистки воды от широкого спектра загрязнителей, включая антибиотики, синтетические красители, тяжелые металлы и микроорганизмы. Установка продемонстрировала высокую производительность при оптимальных параметрах работы: плотность тока 10 мА/см^2 , pH 12, температура 25°C и скорость потока $0,3 \text{ л/мин}$. Выход по току Fe(VI) достиг 78%, что обеспечило эффективность удаления загрязнителей на уровне 86% для амоксициллина, 96% для метиленового синего, 94% для дрожжевых клеток и 95% для ионов Pb^{2+} . Ключевыми механизмами очистки стали: окисление органических соединений до CO_2 и H_2O (редокс-потенциал $\text{Fe(VI)} +2,2 \text{ В}$), коагуляция взвешенных частиц гидроксидами железа Fe(OH)_3 , обеззараживание за счет повреждения клеточных структур патогенов. Конструкция генератора основана на использовании железной стружки (сталь Ст3) в качестве анода, что снизило стоимость на 90% по сравнению с традиционными электродами. Модульная система обеспечила гибкость при работе с малыми объемами (50-200 мл) и различными типами загрязнений. Однако производительность установки ограничена $0,5 \text{ л/час}$, а необходимость частой замены диафрагмы при высокоминерализованных стоках увеличивает эксплуатационные затраты. Преимущества технологии включают экологическую безопасность (отсутствие токсичных побочных продуктов, таких как диоксины), экономичность и многофункциональность. Для анализа использовались спектрофотометрия ($\lambda = 510 \text{ нм}$ для Fe(VI)), турбидиметрия (OD_{600} для дрожжей) и рефрактометрия, что обеспечило точность измерений при минимальных затратах. Перспективы работы связаны с интеграцией IoT-датчиков для онлайн-мониторинга и применением возобновляемых источников энергии. Результаты подтверждают потенциал ферратов как рентабельного и экологически чистого решения для водоочистки, особенно в регионах с ограниченными ресурсами.

S. Yu. Kireev, V. N. Shtepa, S. N. Kireeva,
A. V. Dubin, Yu. N. Kirilina, V. A. Krylov

LABORATORY FERRATE GENERATOR: DESIGN, MODES, EFFICIENCY

Keywords: ferrates, water purification, electrochemical synthesis, xenobiotics, environmental safety, laboratory generator, purification efficiency.

The article is devoted to the development and optimization of a laboratory ferrate generator (Fe(VI)) for effective water purification from a wide range of pollutants, including antibiotics, synthetic dyes, heavy metals and microorganisms. The installation has demonstrated high performance with optimal operating parameters: current density 10 mA/cm^2 , pH 12, temperature 25°C and flow rate 0.3 l/min . The current yield of Fe(VI) reached 78%, which ensured a pollutant removal efficiency of 86% for amoxicillin, 96% for methylene blue, 94% for yeast cells, and 95% for Pb^{2+} ions. The key mechanisms of steel purification: oxidation of organic compounds to CO_2 and H_2O (redox potential $\text{Fe(VI)} +2,2 \text{ V}$), coagulation of suspended particles with iron hydroxides Fe(OH)_3 , disinfection due to damage to cellular structures of pathogens. The generator's design is based on the use of iron shavings (St3 steel) as an anode, which reduced the cost by 90% compared to traditional electrodes. The modular system provides flexibility for handling small volumes (50-200 ml) and various types of contaminants. However, the plant's capacity is limited to $0,5 \text{ liters/hour}$, and the need for frequent replacement of the diaphragm in highly mineralized drains increases operating costs. The advantages of the technology include environmental safety (absence of toxic by-products such as dioxins), cost-effectiveness and versatility. Spectrophotometry ($\lambda = 510 \text{ nm}$ for Fe(VI)), turbidimetry (OD_{600} for yeast) and refractometry were used for the analysis, which ensured the accuracy of measurements at minimal cost. The prospects of the work are related to the integration of IoT sensors for online monitoring and the use of renewable energy sources. The results confirm the potential of ferrates as a cost-effective and environmentally friendly solution for water treatment, especially in regions with limited resources.

Введение

Актуальность вопроса. Загрязнение водных ресурсов антибиотиками, органическими взвесями и синтетическими красителями остается одной из ключевых экологических проблем XXI века. Ежегодно в окружающую среду попадает свыше 100 тыс. тонн антибиотиков, что способствует развитию антибиотикорезистентности микроорганизмов [1]. Традиционные методы очистки, такие как биodeградация, сорбция или озонирование, зачастую недостаточно эффективны против устойчивых

соединений, таких как β -лактамы антибиотики или хлорорганические красители [2]. В этом контексте ферраты (Fe(VI)) привлекают внимание благодаря сочетанию окислительных, коагуляционных и дезинфицирующих свойств [3].

Состояние вопроса в литературе. Ферраты (Fe(VI)) характеризуются высоким редокс-потенциалом ($+2,2 \text{ В}$ в щелочной среде), что делает их мощными окислителями, способными разрушать сложные органические молекулы до простых нетоксичных продуктов, таких как CO_2 и H_2O [4]. Это свойство позволяет ферратам эффективно

удалять широкий спектр загрязнителей, включая антибиотики, красители и тяжелые металлы. Однако их промышленное применение ограничено нестабильностью Fe(VI) в водной среде, особенно при pH ниже 12, где происходит быстрый распад до Fe(III) [5, 6]. Кроме того, высокая стоимость анализа с использованием методов высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) или масс-спектрометрии затрудняет внедрение технологии в регионах с ограниченными ресурсами [7].

Более ранние наши исследования по электрохимическому модулю для очистки сточных вод мясоперерабатывающих предприятий, были сосредоточены на промышленных установках, которые требуют значительных энергозатрат и сложного оборудования [8]. В то же время лабораторные модели, предназначенные для малообъемных экспериментов, нуждаются в оптимизации параметров, таких как плотность тока, pH и температура, для повышения эффективности синтеза Fe(VI) [9].

Ферраты обладают рядом уникальных преимуществ, которые делают их перспективной альтернативой традиционным методам очистки воды. Во-первых, их многофункциональность позволяет одновременно решать несколько задач: окисление органических загрязнителей, коагуляцию взвешенных частиц и обеззараживание воды. Например, Fe(VI) эффективно разрушает антибиотики, такие как амоксициллин, до нетоксичных продуктов, одновременно осаждая тяжелые металлы и инактивируя патогенные микроорганизмы [10, 11].

Во-вторых, ферраты экологически безопасны, так как не образуют токсичных побочных продуктов, таких как диоксины или тригалометаны, которые характерны для хлорирования. Хлорирование, несмотря на свою эффективность, может приводить к образованию диоксинов, особенно при обработке фенолсодержащих стоков. Например, хлорирование 2,4,6-трихлорфенола в щелочной среде может привести к синтезу 2,3,7,8-тетрахлордибензо-р-диоксина (TCDD), одного из самых токсичных соединений [12]. В отличие от этого, ферраты окисляют органику без образования галогенированных соединений, что делает их более безопасными для окружающей среды [13].

В-третьих, использование железной стружки в качестве анодного материала значительно снижает стоимость технологии по сравнению с дорогостоящими спеченными электродами, что делает ферраты экономически выгодными для малых и средних предприятий. Кроме того, модульная конструкция лабораторных генераторов позволяет легко адаптировать их для различных типов загрязнений, таких как антибиотики, красители или микропластик [14].

Несмотря на многочисленные преимущества, применение ферратов имеет и свои ограничения. Основным недостатком является быстрый распад Fe(VI) при pH ниже 12, что требует поддержания строго щелочных условий для стабильности процесса [3]. Это увеличивает эксплуатационные

затраты и усложняет управление системой. Кроме того, для эффективного синтеза Fe(VI) необходим точный контроль таких параметров, как температура и плотность тока. Например, повышение плотности тока свыше 10 мА/см² приводит к доминированию побочной реакции выделения кислорода, что снижает выход Fe(VI) [15].

Еще одним ограничением является необходимость частой замены диафрагмы при работе с высокоминерализованными стоками, что увеличивает затраты на обслуживание [16]. Однако эти недостатки компенсируются высокой эффективностью очистки и экологической безопасностью технологии, что делает ферраты перспективным инструментом для решения задач водоочистки.

По сравнению с традиционными методами, такими как озонирование или хлорирование, ферраты обладают рядом преимуществ. Озонирование, хотя и эффективно, требует значительных энергозатрат и может приводить к образованию токсичных побочных продуктов, таких как броматы [17, 18]. Хлорирование, как уже упоминалось, связано с риском образования диоксинов и тригалометанов, что ограничивает его применение [19]. В отличие от этого, ферраты обеспечивают комплексную очистку без образования токсичных соединений, что делает их более безопасными и экологически чистыми [3].

Таким образом, ферраты представляют собой перспективную технологию для очистки воды, сочетающую высокую эффективность, экологическую безопасность и экономичность. Однако для их широкого внедрения требуется дальнейшая оптимизация параметров синтеза и разработка более устойчивых конструкций генераторов.

Цель работы: Разработка лабораторного генератора ферратов, оптимизация его рабочих параметров (плотность тока, pH, скорость потока) и оценка эффективности удаления ксенобиотиков (антибиотики, красители, тяжелые металлы) с применением доступных методов анализа.

Методика эксперимента:

Приготовление растворов. Для проведения экспериментов использовался электролит на основе 0,5 М NaOH (pH = 12), кислотность которого корректировали добавлением 5% H₂SO₄. В качестве модельных загрязнителей применялись амоксициллин (10 мг/л), метиленовый синий (10 мг/л), суспензия дрожжевых клеток (оптическая плотность OD₆₀₀ = 0.8) и раствор ионов Pb²⁺ (5 мг/л).

Конструкция генератора. Лабораторный генератор ферратов состоял из анодного модуля, содержащего железную стружку (сталь Ст3, фракция 0,5-1 мм), помещенную в перфорированный полимерный контейнер. Катод изготовлен из нержавеющей стали 08X18H10T (площадь 50 см²). Подача электролита осуществлялась через перистальтический насос с регулируемой скоростью (0,1-0,5 л/мин). Для разделения катодного и анодного пространств использовалась брезентовая ткань,

предотвращающая смешивание продуктов электролиза.

Достоинства и недостатки конструкции. Ключевыми преимуществами установки являются: использование доступных материалов, таких как железная стружка, что снизило стоимость анода на 90% по сравнению со спеченными электродами [20], а также модульная конструкция, позволяющая легко заменять компоненты (аноды, диафрагмы). Низкое энергопотребление (0,5-1,2 Вт·ч/л) сделало систему экономичной для лабораторных исследований. Однако конструкция имела ограниченную производительность (до 0,5 л/час), что затрудняло масштабирование, и требовала частой замены диафрагмы при работе с модельными растворами, содержащими высокие концентрации взвешенных частиц из-за её засорения.

Методы анализа. Концентрация ферратов определялась методом спектрофотометрии при длине волны 510 нм. Для анализа амоксициллина и метиленового синего использовались длины волн 272 нм и 664 нм соответственно. Концентрация дрожжевых клеток контролировалась турбидиметрией по оптической плотности при 600, а минерализация растворов оценивалась с помощью рефрактометрии.

Для количественного определения Fe(VI) был построен калибровочный график на основе спектрофотометрических данных стандартных растворов Na_2FeO_4 . Оптическая плотность измерялась в диапазоне концентраций 0,0-5,0 мг/л, демонстрируя линейную зависимость (Рисунок 1, уравнение 1) ($R^2 = 0,999$).

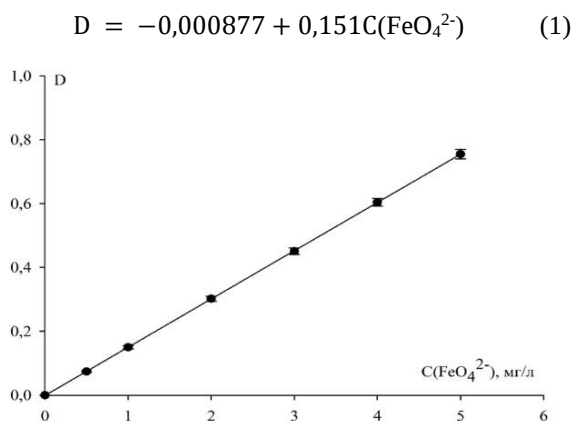


Рис. 1 – Калибровочный график зависимости оптической плотности раствора от концентрации ферратов при длине волны 510 нм, толщине светопоглощающего слоя 1 см

Fig. 1 – Calibration graph of the dependence of the optical density of the solution on the concentration of ferrates at a wavelength of 510 nm and a thickness of the light-absorbing layer of 1 cm

Экспериментальная часть

Для определения оптимальных режимов работы генератора ферратов были проведены эксперименты,

в которых варьировались ключевые параметры: плотность тока, температура, скорость потока раствора через анодное пространство и pH раствора. Выход по току ферратов (η) рассчитывался как отношение фактически полученного количества Fe(VI) к теоретически возможному, исходя из закона Фарадея. Результаты экспериментов представлены на рисунках с указанием доверительных интервалов для каждой серии измерений.

Зависимость выхода по току от плотности тока. Исследование проводилось при постоянных значениях pH = 12, температуре 25°C и скорости потока 0,3 л/мин. Плотность тока варьировалась в диапазоне 5-20 мА/см². Результаты представлены на рисунке 2.

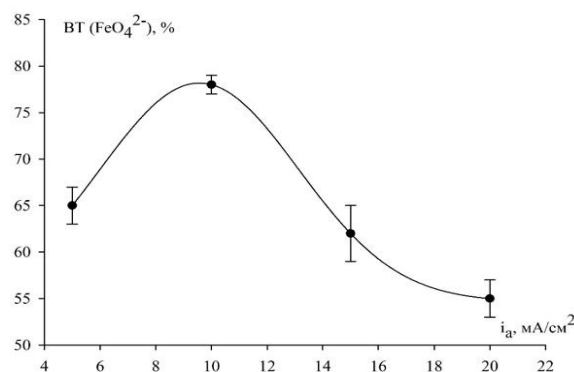


Рис. 2 – Зависимость выхода по току ферратов от анодной плотности тока в проточном генераторе ферратов

Fig. 2 – Dependence of the ferrate current output on the anode current density in a ferrate flow generator

Максимальный выход по току (78%) наблюдался при плотности тока 10 мА/см². Увеличение плотности тока свыше 10 мА/см² приводило к доминированию побочной реакции выделения кислорода, что снижало эффективность синтеза Fe(VI).

Зависимость выхода по току от температуры. Эксперименты проводились при плотности тока 10 мА/см², pH = 12 и скорости потока 0,3 л/мин. Температура варьировалась в диапазоне 20-40°C. Результаты приведены на рисунке 3.

Оптимальная температура составила 25°C. Повышение температуры до 40°C ускоряло распад Fe(VI), снижая выход по току.

Зависимость выхода по току от скорости потока. Исследование проводилось при плотности тока 10 мА/см², pH = 12 и температуре 25°C. Скорость потока варьировалась в диапазоне 0,1-0,5 л/мин. Результаты представлены на рисунке 4.

Максимальный выход по току (78%) достигнут при скорости потока 0,3 л/мин. Увеличение скорости потока до 0,5 л/мин снижало время контакта реагентов, что уменьшало эффективность синтеза.

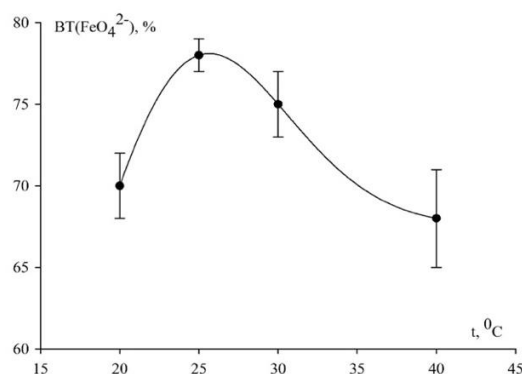


Рис. 3 – Зависимость анодного выхода по току ферратов от температуры раствора в проточном генераторе ферратов

Fig. 3 – Dependence of the anode current output of ferrates on the temperature of the solution in a ferrate flow generator

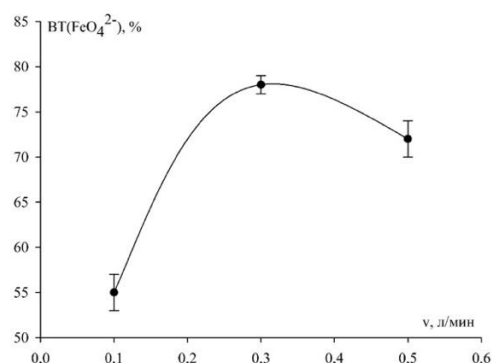


Рис. 4 – Зависимость анодного выхода по току ферратов от скорости потока раствора через анодную камеру в проточном генераторе ферратов

Fig. 4 – Dependence of the anode current output of ferrates on the flow rate of the solution through the anode chamber in a ferrate flow generator

Зависимость выхода по току от pH раствора. Эксперименты проводились при плотности тока 10 мА/см², температуре 25°C и скорости потока 0,3 л/мин. Значение pH варьировалось в диапазоне 10-13. Результаты приведены на рисунке 5.

Оптимальное значение pH составило 12. Снижение pH ниже 12 ускоряло распад Fe(VI) до Fe(III), а повышение pH выше 12 замедляло кинетику анодного окисления железа.

Таким образом, максимальный выход по току ферратов (78%) был достигнут при плотности тока 10 мА/см², температуре 25°C, скорости потока 0,3 л/мин и pH = 12. Эти параметры обеспечивают баланс между скоростью синтеза Fe(VI) и его стабильностью в растворе. При плотности тока выше 10 мА/см² доминирует реакция выделения кислорода, что снижает эффективность синтеза. Температура 25°C оптимальна для предотвращения термического распада Fe(VI), а скорость потока 0,3 л/мин обеспечивает достаточное время контакта реагентов. Поддержание pH на уровне 12 критически

важно для стабильности Fe(VI), так как при более низких значениях pH происходит быстрый распад ферратов, а при более высоких – замедляется кинетика анодного окисления.

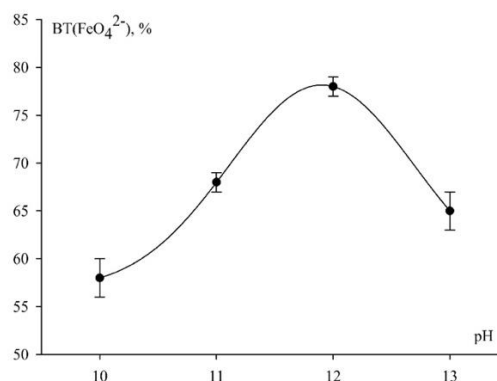


Рис. 5 – Зависимость анодного выхода по току ферратов от pH раствора в проточном генераторе ферратов

Fig. 5 – Dependence of the anode current output of ferrates on the pH of the solution in a ferrate flow generator

Эффективность удаления загрязнителей ферратами (Fe(VI)) достигается за счет трех взаимосвязанных механизмов: окисления, коагуляции и обеззараживания. Каждый из этих процессов вносит вклад в общий результат, что подтверждается экспериментальными данными по очистке воды от амоксициллина (86%), метиленового синего (96%), дрожжевых клеток (94%) и ионов Pb²⁺ (95%) (таблица 1).

Таблица 1 – Эффективность удаления ксенобиотиков из модельных сред электрохимически генерированным ферратом

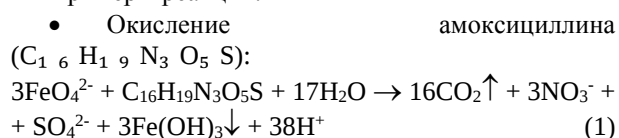
Table 1 – Efficiency of xenobiotic removal from model media by electrochemically generated ferrate

Загрязнитель	Концентрация Fe(VI), мг/л	Время обработки, мин	Эффективность, %
Амоксициллин	5	30	86
Метиленовый синий	5	15	96
Дрожжевые клетки	5	20	94
Pb ²⁺	5	30	95

1. Окисление органических соединений:

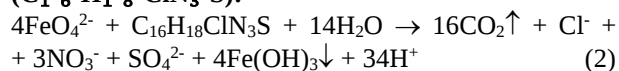
Fe(VI) выступает сильным окислителем (редокс-потенциал +2,2 В в щелочной среде), разрушая сложные органические молекулы до более простых малотоксичных продуктов.

Примеры реакций:



Реакция приводит к разрыву β -лактамного кольца и полной минерализации антибиотика, что подтверждается снижением оптической плотности при 272 нм [21].

• **Деструкция метиленового синего ($C_{16}H_{18}ClN_3S$):**



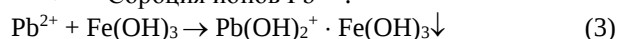
Разрушение хромофорной группы красителя регистрируется по исчезновению пика поглощения при 664 нм [22].

2. **Коагуляция взвешенных частиц:**

При восстановлении Fe(VI) до Fe(III) образуются гидроксиды железа $Fe(OH)_3$, которые действуют как коагулянты, агрегируя коллоидные частицы и тяжелые металлы.

Механизм коагуляции:

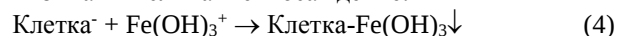
- Сорбция ионов Pb^{2+} :



Ионы свинца сорбируются на поверхности $Fe(OH)_3$ и осаждаются, что снижает их концентрацию в растворе [23].

- Агрегация дрожжевых клеток:

Гидроксиды железа нейтрализуют отрицательный заряд клеточных мембран дрожжей, вызывая их слипание и осаждение:



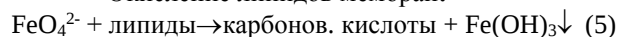
Это подтверждается снижением оптической плотности суспензии при 600 нм [24].

3. **Обеззараживание:**

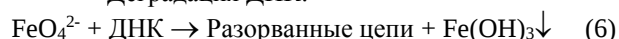
Fe(VI) инактивирует микроорганизмы за счет окислительного повреждения клеточных структур.

Механизм обеззараживания:

- Окисление липидов мембран:



- Дегградация ДНК:



Повреждение мембран и генетического материала приводит к гибели микроорганизмов [25].

Роль pH в эффективности очистки.

Поддержание pH = 12 критически важно для стабильности Fe(VI). В щелочной среде доминирует ион FeO_4^{2-} , тогда как при pH < 12 происходит быстрый распад:



Этот процесс снижает концентрацию активного Fe(VI) и эффективность окисления [26].

Обсуждение результатов:

Высокая эффективность очистки (86-96%) объясняется синергизмом механизмов:

1. Окисление разрушает устойчивые органические соединения (амоксациллин, красители) до CO_2 и H_2O .

2. Коагуляция $Fe(OH)_3$ удаляет взвешенные частицы и тяжелые металлы за счет сорбции.

3. Обеззараживание обеспечивает инактивацию патогенов.

Оптимальные параметры (pH = 12, плотность тока 10 мА/см²) максимизируют выход Fe(VI) и минимизируют его распад.

Заключение

Разработанный лабораторный генератор ферратов (Fe(VI)) продемонстрировал высокую эффективность в удалении широкого спектра ксенобиотиков, включая антибиотики, красители, тяжелые металлы и микроорганизмы. Экспериментально установлено, что при оптимальных параметрах работы (плотность тока 10 мА/см², pH = 12, температура 25°C, скорость потока 0,3 л/мин) выход по току достигает 78%, а эффективность очистки варьируется в диапазоне 86-96% в зависимости от типа загрязнителя. Это стало возможным благодаря синергии трех ключевых механизмов: окисления органических соединений до CO_2 и H_2O , коагуляции взвешенных частиц гидроксидами железа и обеззараживания за счет повреждения клеточных структур патогенов.

Главным преимуществом технологии является её экологическая безопасность. В отличие от хлорирования, которое сопряжено с риском образования токсичных диоксинов и тригалометанов, ферраты не генерируют опасных побочных продуктов. Кроме того, использование железной стружки в качестве анодного материала и модульная конструкция установки обеспечивают экономичность и гибкость, делая технологию доступной для лабораторий с ограниченными ресурсами. Применение спектрофотометрии, турбидиметрии и рефрактометрии позволило минимизировать затраты на анализ без потери точности.

Однако технология имеет и ограничения. Низкая производительность (до 0,5 л/час) затрудняет масштабирование для промышленных нужд, а необходимость частой замены диафрагмы при работе с высокоминерализованными стоками увеличивает эксплуатационные расходы. Эти проблемы требуют дальнейшей оптимизации, включая разработку более устойчивых материалов для диафрагм и повышение стабильности Fe(VI) в широком диапазоне условий.

Перспективы исследования связаны с интеграцией современных технологий, таких как IoT-датчики для онлайн-мониторинга параметров синтеза, и использованием возобновляемых источников энергии для повышения автономности установки. Результаты работы согласуются с мировыми тенденциями в области водоочистки, подтверждая потенциал ферратов как многофункционального и экологически безопасного реагента. Внедрение подобных систем может стать важным шагом в решении глобальных проблем загрязнения водных ресурсов, особенно в регионах с ограниченным доступом к дорогостоящим технологиям.

Литература

1. P. Chaturvedi, P. Shukla, B. S. Giri, P. Chowdhary, R. Chandra, P. Gupta, A. Pandey, *Environ. Res. J.*, **194**, Article 110664 (2021). DOI: 10.1016/j.envres. 2020.110664
2. A. K. Nadda, P. Banerjee, S. Sharma, *Microbes and Enzymes for Water Treatment and Remediation*. CRC Press, Boca Raton FL, 2024. P. 13-44.

3. S. Y. Kireev, V. N. Shtepa, S.N. Kireeva, A.V. Kozyr', A.B. Shikunets, L.V. Naumov, *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, **58**, 2, 469-474 (2024). DOI:10.1134/S004057952401013X
4. V. K. Sharma, R. Doong, H. Kim, R. S. Varma, D. D. Dionysiou, *Ferrites and Ferrates: Chemistry and Applications in Sustainable Energy and Environmental Remediation*. American Chemical Society, Washington, 2016. P. 161-220. DOI: 10.1021/bk-2016-1238
5. Y. Gong, Y. Wang, N. Lin, R. Wang, M. Wang, X. Zhang, *Environ. Pollut.*, **299**, 15, Article 118871 (2022). DOI: 10.1016/j.envpol.2022.118871
6. V. K. Sharma, M. Feng, D. D. Dionysiou, H. Zhou, C. Jinadatha, K. Manoli, M. Smith, R. Luque, X. Ma, C. Huang, *Environ. Sci. Technol.*, **56**, 1, 30-47 (2021). DOI: 10.1021/acs.est.1c04616
7. A. P. S. Hettiyadura, A. Laskin, *J. Mass Spectrom.*, **57**, 2, Article e4804 (2021). DOI: 10.1002/jms.4804
8. С. Ю. Киреев, В. Н. Штепа, С. Н. Киреева, А. В. Козырь, А. Б. Шикунец, Л. В. Наумов, *Хим. технол.*, **25**, 2, 67-73 (2024).
9. M. Veciana, J. Brauning, A. Farhat, M. Pype, S. Freguia, G. Carvalho, J. Keller, P. Ledezma, *J. Hazard. Mater.*, **434**, 15, Article 128886 (2022). DOI: 10.1016/j.jhazmat.2022.128886
10. L. Wang, S. Lv, X. Wang, B. Liu, Z. Wang, *Front. Vet. Sci.*, **8**, Article 773089 (2021). DOI: 10.3389/fvets. 2021. 773089
11. L. Lalthazuala, Lalmunsiamia, C. Vanlalthmingmawia, D. Tiwari, S. S. Choi, S. Lee, *Appl. Chem. Eng.*, **33**, 3, 258-271 (2022). DOI: 10.14478/ace.2022.1048
12. N. Mathew, A. Somanathan, A. Tirpude, A. M. Pillai, P. Mondal, T. Arfin, *Anal. Methods*, **17**, 1698-1748 (2025).
13. J. Yu, Sumita, K. Zhang, Q. Zhu, C. Wu, S. Huang, Y. Zhang, S. Yao, W. Pang, *Water*, **15**, 4, Article 699 (2023). DOI: 10.3390/w15040699
14. S. Wang, A. Hadji-Thomas, A. Adekunle, V. Raghavan, *Sci. Total Environ.*, **930**, 20, Article 172737 (2024). DOI: /10.1016/j.scitotenv.2024.172737
15. G. Ndzungu, C. Zvinowanda, J. C. Ngila, *Appl. Water Sci.*, **14**, 3, Article 47 (2024). DOI:10.1007/s13201-023-02076-3
16. Y. Wang, C. Wang, R. Feng, Y. Li, Z. Zhang, S. Guo, *Environ. Res.*, **251**, 1, Article 118545 (2024). DOI: 10.1016/j.envres.2024.118545
17. B. N. Jahan, L. Li, K. R. Pagilla, *Chemosphere*, **266**, 10, Article 128964 (2021). DOI:10.1016/j.chemosphere.2020.128964
18. R. Joshi, T. Ratpukdi, K. Knutson, A. Bhatnagar, E. Khan, *Crit Rev. Environ. Sci. Technol.*, **52**, 7, 1154-1198 (2022). DOI: 10.1080/10643389.2020.1831357
19. A. Jabłońska-Trypuć, *Water Environ. Res.*, **95**, 9, Article e10920 (2023). DOI: 10.1002/wer.10920
20. R. Sharma, H. Kumar, G. Kumar, S. Sharma, R. Aneja, A. K. Sharma, R. Kumar, P. Kumar, *Chem. Eng. J.*, **468**, 15, Article 143706 (2023). DOI:10.1016/j.cej.2023.143706
21. F. Zisti, S. Abdullaev, S. Hydar, S. O. Rab, N. Misra, S. H. J. Ali, A. H. Alawadi, A. Alsalamy, N. Mengelizadeh, D. Balarak, *Clean Technol. Environ. Policy*, **26**, 1-20 (2024). DOI:10.1007/s10098-023-02630-8
22. I. Khan, K. Saeed, I. Zekker, B. Zhang, A. H. Hendi, A. Ahmad, S. Ahmad, N. Zada, H. Ahmad, L. A. Shah, T. Shah, I. Khan, *Water*, **14**, 2, Article 242 (2022). DOI: 10.3390/w14020242
23. P. Praipipat, P. Ngamsurach, A. Sanghuayprai, *Sci. Rep.*, **13**, 1, Article 1467 (2023). DOI: 10.1038/s41598-023-28647-2
24. P. H. Tsilo, A. K. Basson, Z. G. Ntombela, N. G. Dlamini, R. V. S. R. Pullabhotla, *Int. J. Mol. Sci.*, **24**, 19, Article 14731 (2023). DOI: 10.3390/ijms241914731
25. X. Fu, J. Gao, Q. Wang, H. Chen, Y. Liu, L. Zeng, Y. Yuan, H. Xu, *J. Hazard. Mater.*, **470**, 15, Article 134254 (2024). DOI: 10.1016/j.jhazmat.2024.134254
26. Y. Liu, Y. Yuan, Y. Wang, H. H. Ngo, J. Wang, *Sci. Total Environ.*, **924**, 10, Article 171430 (2024). DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.171430

References

1. P. Chaturvedi, P. Shukla, B. S. Giri, P. Chowdhary, R. Chandra, P. Gupta, A. Pandey, *Environ. Res. J.*, **194**, Article 110664 (2021). DOI: 10.1016/j.envres.2020.110664
2. A. K. Nadda, P. Banerjee, S. Sharma, *Microbes and Enzymes for Water Treatment and Remediation*. CRC Press, Boca Raton FL, 2024. P. 13-44.
3. S. Y. Kireev, V. N. Shtepa, S.N. Kireeva, A.V. Kozyr', A. B. Shikunets, L. V. Naumov, *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, **58**, 2, 469-474 (2024). DOI:10.1134/S004057952401013X
4. V. K. Sharma, R. Doong, H. Kim, R. S. Varma, D. D. Dionysiou, *Ferrites and Ferrates: Chemistry and Applications in Sustainable Energy and Environmental Remediation*. American Chemical Society, Washington, 2016. P. 161-220. DOI: 10.1021/bk-2016-1238
5. Y. Gong, Y. Wang, N. Lin, R. Wang, M. Wang, X. Zhang, *Environ. Pollut.*, **299**, 15, Article 118871 (2022). DOI: 10.1016/j.envpol.2022.118871
6. V. K. Sharma, M. Feng, D. D. Dionysiou, H. Zhou, C. Jinadatha, K. Manoli, M. Smith, R. Luque, X. Ma, C. Huang, *Environ. Sci. Technol.*, **56**, 1, 30-47 (2021). DOI: 10.1021/acs.est.1c04616
7. A. P. S. Hettiyadura, A. Laskin, *J. Mass Spectrom.*, **57**, 2, Article e4804 (2021). DOI: 10.1002/jms.4804
8. S. Y. Kireev, V. N. Shtepa, S. N. Kireeva, A. V. Kozyr', A. B. Shikunets, L. V. Naumov, *Chem. Technol.*, **25**, 2, 67-73 (2024).
9. M. Veciana, J. Brauning, A. Farhat, M. Pype, S. Freguia, G. Carvalho, J. Keller, P. Ledezma, *J. Hazard. Mater.*, **434**, 15, Article 128886 (2022). DOI: 10.1016/j.jhazmat.2022.128886
10. L. Wang, S. Lv, X. Wang, B. Liu, Z. Wang, *Front. Vet. Sci.*, **8**, Article 773089 (2021). DOI: 10.3389/fvets. 2021. 773089
11. L. Lalthazuala, Lalmunsiamia, C. Vanlalthmingmawia, D. Tiwari, S. S. Choi, S. Lee, *Appl. Chem. Eng.*, **33**, 3, 258-271 (2022). DOI: 10.14478/ace.2022.1048
12. N. Mathew, A. Somanathan, A. Tirpude, A. M. Pillai, P. Mondal, T. Arfin, *Anal. Methods*, **17**, 1698-1748 (2025).
13. J. J. Yu, Sumita, K. Zhang, Q. Zhu, C. Wu, S. Huang, Y. Zhang, S. Yao, W. Pang, *Water*, **15**, 4, Article 699 (2023). DOI: 10.3390/w15040699
14. S. Wang, A. Hadji-Thomas, A. Adekunle, V. Raghavan, *Sci. Total Environ.*, **930**, 20, Article 172737 (2024). DOI: /10.1016/j.scitotenv.2024.172737
15. G. Ndzungu, C. Zvinowanda, J. C. Ngila, *Appl. Water Sci.*, **14**, 3, Article 47 (2024). DOI:10.1007/s13201-023-02076-3
16. Y. Wang, C. Wang, R. Feng, Y. Li, Z. Zhang, S. Guo, *Environ. Res.*, **251**, 1, Article 118545 (2024). DOI: 10.1016/j.envres.2024.118545
17. B. N. Jahan, L. Li, K. R. Pagilla, *Chemosphere*, **266**, 10, Article 128964 (2021). DOI:10.1016/j.chemosphere.2020.128964
18. R. Joshi, T. Ratpukdi, K. Knutson, A. Bhatnagar, E. Khan, *Crit Rev. Environ. Sci. Technol.*, **52**, 7, 1154-1198 (2022). DOI: 10.1080/10643389.2020.1831357
19. A. Jabłońska-Trypuć, *Water Environ. Res.*, **95**, 9, Article e10920 (2023). DOI: 10.1002/wer.10920
20. R. Sharma, H. Kumar, G. Kumar, S. Sharma, R. Aneja, A. K. Sharma, R. Kumar, P. Kumar, *Chem. Eng. J.*, **468**, 15, Article 143706 (2023). DOI:10.1016/j.cej.2023.143706
21. F. Zisti, S. Abdullaev, S. Hydar, S. O. Rab, N. Misra, S. H. J. Ali, A. H. Alawadi, A. Alsalamy, N. Mengelizadeh, D. Balarak, *Clean Technol. Environ. Policy*, **26**, 1-20 (2024). DOI:10.1007/s10098-023-02630-8
22. I. Khan, K. Saeed, I. Zekker, B. Zhang, A. H. Hendi, A. Ahmad, S. Ahmad, N. Zada, H. Ahmad, L. A. Shah, T. Shah, I. Khan, *Water*, **14**, 2, Article 242 (2022). DOI: 10.3390/w14020242
23. P. Praipipat, P. Ngamsurach, A. Sanghuayprai, *Sci. Rep.*, **13**, 1, Article 1467 (2023). DOI: 10.1038/s41598-023-28647-2
24. P. H. Tsilo, A. K. Basson, Z. G. Ntombela, N. G. Dlamini, R. V. S. R. Pullabhotla, *Int. J. Mol. Sci.*, **24**, 19, Article 14731 (2023). DOI: 10.3390/ijms241914731
25. X. Fu, J. Gao, Q. Wang, H. Chen, Y. Liu, L. Zeng, Y. Yuan, H. Xu, *J. Hazard. Mater.*, **470**, 15, Article 134254 (2024). DOI: 10.1016/j.jhazmat.2024.134254
26. Y. Liu, Y. Yuan, Y. Wang, H. H. Ngo, J. Wang, *Sci. Total Environ.*, **924**, 10, Article 171430 (2024). DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.171430

D. Balarak, *Clean Technol. Environ. Policy*, **26**, 1-20 (2024). DOI:10.1007/s10098-023-02630-8
22. I. Khan, K. Saeed, I. Zekker, B. Zhang, A. H. Hendi, A. Ahmad, S. Ahmad, N. Zada, H. Ahmad, L. A. Shah, T. Shah, I. Khan, *Water*, **14**, 2, Article 242 (2022). DOI: 10.3390/w14020242
23. P. Praipipat, P. Ngamsurach, A. Sanghuayprai, *Sci. Rep.*, **13**, 1, Article 1467 (2023). DOI: 10.1038/s41598-023-28647-2

24. P. H. Tsilo, A. K. Basson, Z. G. Ntombela, N. G. Dlamini, R. V. S. R. Pullabhotla, *Int. J. Mol. Sci.*, **24**, 19, Article 14731 (2023). DOI: 10.3390/ijms241914731
25. X. Fu, J. Gao, Q. Wang, H. Chen, Y. Liu, L. Zeng, Y. Yuan, H. Xu, *J. Hazard. Mater.*, **470**, 15, Article 134254 (2024). DOI: 10.1016/j.jhazmat.2024.134254
26. Y. Liu, Y. Yuan, Y. Wang, H. H. Ngo, J. Wang, *Sci. Total Environ.*, **924**, 10, Article 171430 (2024). DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.171430

© **С. Ю. Киреев** – доктор технических наук, профессор, декан факультета Промышленных технологий, электроэнергетики и транспорта, заведующий кафедрой «Химия», Пензенский государственный университет (ПГУ), Пенза, Россия, sergey58_79@mail.ru; Dean_fptet@pnzgu.ru; **С.Н. Киреева** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Химия» ПГУ, svetlana58_75@mail.ru; **Ю. Н. Кирилина** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Химия», ПГУ, kirilina.julija@yandex.ru; **В. Н. Штепа** – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой Безопасности жизнедеятельности, Белорусский государственный технологический университет (БГТУ), Минск, Республика Беларусь, tppoless@gmail.com; **А. В. Дубин** – старший преподаватель кафедры Промышленной экологии, БГТУ, dubina@belstu.by; **В. А. Крылов** – ведущий инженер-технолог ООО «Маяк-Техноцелл», Пенза, Россия; аспирант кафедры «Химия» ПГУ, vlad09082014@mail.ru, VKrylov@mayak-technocell.com.

© **S. Yu. Kireev** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor, Dean of the Faculty of Industrial Technologies, Electric Power Engineering and Transport, Head of the Department of Chemistry, Penza State University (PSU), Penza, Russia, sergey58_79@mail.ru, Dean_fptet@pnzgu.ru; **S. N. Kireeva** – PhD (Technical Sci.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Chemistry, PSU, svetlana58_75@mail.ru; **Yu. N. Kirilina** – PhD (Technical Sci.), Associate Professor of the Department of Chemistry, PSU, kirilina.julija@yandex.ru; **V. N. Shtepa** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Associate Professor, Head of the Department of Life Safety of the Belarusian State Technological University (BSTU), Minsk, Republic of Belarus, tppoless@gmail.com; **A. V. Dubin** – Senior Lecturer at the Department of Industrial Ecology, BSTU, dubina@belstu.by; **V. A. Krylov** – Leading Process Engineer, Mayak-Technocell LLC, Penza, Russia; PhD-student of the Department of Chemistry, PSU, vlad09082014@mail.ru, VKrylov@mayak-technocell.com.

Дата поступления рукописи в редакцию – 27.03.25.

Дата принятия рукописи в печать – 09.04.25.