

На основании проведенного анализа характеристик аустенитно-ферритных сталей установлено, что оптимальным направлением для дальнейшего исследования являются супердуплексные стали, так как в сравнении с другими группами они обладают более высокой коррозионной стойкостью и механической прочностью, что позволит существенно расширить области эффективного применения в ответственных конструкциях разных сфер промышленности.

Литература

1. Металловедение и термическая обработка сварных соединений : учебное пособие для вузов / Л. А. Ефименко, А. К. Прыгаев, О. Ю. Елагина. - Москва : Логос, 2007. - 456 с.
2. СТО ИНТИ S.00.2-2023 Стали специальные коррозионно-стойкие аустенитно-ферритного класса. Общие технические требования. – [текст]. – Москва: АНО "Институт нефтегазовых технологических инициатив", 2023. — 30 с.
3. Седухин, В.В.Совершенствование химического состава и технологии выплавки дуплексной марки стали, легированной азотом, в открытой индукционной печи : дис. ... кандидата технических наук : 2.6.2. / Седухин Вадим Валерьевич; [Место защиты: ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» ; Диссовет 24.2.437.01 (Д 212.298.01)]. - Челябинск, 2023. - 25 с.
4. Левина, А.В. Формирование структуры, фазового состава и свойств при термическом и деформационном воздействии аустенитно-ферритной стали 03Х14Н10К5М2ЮТ2 для упругих элементов: дис... кандидата технических наук: 05.16.01 / Левина Анна Владимировна; [Место защиты: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»]. – Екатеринбург, 2015. – 145 с.
5. Charles J. Duplex Stainless Steels- a Review after DSS '07 held in Grado //steel research international. – 2008. – Т. 79. – №. 6. – С. 455-465.

УДК 628.543:66.095.3

ПРИМЕНЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО ГЕНЕРАТОРА ФЕРРАТОВ ДЛЯ УДАЛЕНИЯ МИКРОПЛАСТИКА ИЗ ВОДНЫХ СРЕД

¹Киреев С.Ю., ²Штепа В.Н., ²Шинкевич К.С., ¹Крылов В.А.

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пензенский государственный университет», г. Пенза, Россия

² Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет», г. Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В статье рассмотрено применение лабораторного генератора ферратов (Fe(VI)) для решения экологических проблем, связанных с загрязнением водных сред микропластиком — продуктом деградации полимерных композитов и отходов. Разработанная модульная установка обеспечивает электрохимический синтез Fe(VI) *in situ* с выходом по току 78% при оптимальных параметрах (плотность тока 10 mA/cm², pH 12, T=25°C). Эксперименты продемонстрировали эффективность удаления микропластика (полиэтилен, 100 мкм) на уровне 75%, а также антибиотиков и красителей (86–96%). Технология способствует рециклингу полимерных отходов за счет их окислительной деградации до нетоксичных продуктов, минимизируя риски для экосистем. Использованы

доступные методы анализа (спектрофотометрия, турбидиметрия). Перспективы — интеграция с IoT для мониторинга и возобновляемой энергией.

Ключевые слова: ферраты, микропластик, рециклинг отходов, экологическая безопасность, электрохимический синтез, очистка воды

APPLICATION OF A LABORATORY FERRATE GENERATOR FOR MICROPLASTIC REMOVAL FROM AQUEOUS MEDIA

¹Kireev S.Yu., ²Shtepa V.N., ²Shinkevich K.S., ¹Krylov V.A.

¹Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Penza State University, Penza, Russia

²Belarusian State Technological University, Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The article considers the application of a laboratory ferrate (Fe(VI)) generator to address environmental issues related to the contamination of aqueous media with microplastics — a degradation product of polymer composites and waste. The developed modular installation ensures electrochemical synthesis of Fe(VI) in situ with a current yield of 78% under optimal parameters (current density 10 mA/cm², pH 12, T=25°C). Experiments demonstrated the efficiency of microplastic removal (polyethylene, 100 µm) at 75%, as well as antibiotics and dyes (86–96%). The technology promotes the recycling of polymeric waste through their oxidative degradation to non-toxic products, minimizing risks to ecosystems. Accessible analysis methods (spectrophotometry, turbidimetry) were used. Prospects include integration with IoT for monitoring and renewable energy.

Keywords: ferrates, microplastic, waste recycling, environmental safety, electrochemical synthesis, water purification

Загрязнение водных экосистем микропластиком, возникающим при деградации полимерных композитов и отходов переработки, представляет одну из ключевых экологических угроз XXI века. Ежегодно в окружающую среду поступает более 100 тыс. тонн полимерных отходов, включая фрагменты полиэтилена и полипропилена, которые накапливаются в водоемах, нарушая пищевые цепи и способствуя токсичному воздействию на гидробионты [1, 2]. Традиционные методы рециклинга, такие как механическая сортировка или пиролиз, часто неэффективны для удаления микропластика из стоков из-за его коллоидных свойств и устойчивости к биодеградации. В этом контексте ферраты железа (Fe(VI)) привлекают внимание как многофункциональный реагент, сочетающий окисление, коагуляцию и дезинфекцию, что позволяет интегрировать процессы очистки с рециклингом полимерных отходов.

Лабораторный генератор ферратов, разработанный авторами, ориентирован на малообъемные эксперименты (50–200 мл) и обеспечивает синтез Fe(VI) in situ без токсичных побочных продуктов, таких как диоксины. Это решение соответствует принципам технической безопасности и устойчивого развития, минимизируя энергозатраты (до 1,2 Вт·ч/л) и используя доступные материалы (железная стружка Ст3). Цель работы — оценка эффективности генератора для удаления микропластика и сопутствующих загрязнителей

(антибиотиков, красителей), с акцентом на экологическую безопасность и рециклинг.

Ферраты (Fe(VI)) характеризуются высоким редокс-потенциалом (+2,2 В в щелочной среде), что обеспечивает окисление полимерных цепей микропластика по следующей упрощенной схеме:



Для полиэтилена (−[CH₂ −CH₂]_n−) процесс деградации включает разрыв C–C связей с образованием CO₂ и H₂ O:



Термодинамический расчет ($\Delta G^\circ \approx -210$ кДж/моль) подтверждает спонтанность реакции при концентрации Fe(VI) 3–5 мг/л [3]. Продукты восстановления — гидроксиды Fe(OH)₃ — способствуют коагуляции фрагментов микропластика (>10 мкм), облегчая их осаждение и последующий рециклинг. В отличие от озонирования или хлорирования, Fe(VI) не формирует галогенированные токсины, обеспечивая экологическую безопасность.

Конструкция генератора включает анодный модуль с железной стружкой в перфорированном полимерном контейнере, катод из нержавеющей стали (площадь 50 см²) и брезентовую диафрагму для разделения пространств [4]. Электролит — 0,5–1 М NaOH (рН 12). Система регулировки позволяет варьировать плотность тока (5–20 мА/см²), температуру (20–40°C) и скорость потока (0,1–0,5 л/мин). Анализ Fe(VI) проводился спектрофотометрией ($\lambda=510$ нм, $\epsilon=1150 \text{ M}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$), микропластика — турбидиметрией (OD₆₀₀).

Эксперименты проводились в модельных водных средах с добавлением микропластика (полиэтилен, фракция 100 мкм, 10 мг/л), амоксициллина (10 мг/л) и метиленового синего (10 мг/л). Синтез Fe(VI) осуществлялся при следующих параметрах: плотность тока 10 мА/см², рН 12, T=25°C, время обработки 15–30 мин. Объем пробы — 100 мл, скорость потока — 0,3 л/мин. Концентрация Fe(VI) контролировалась по калибровочному графику [5, 6].

Оптимальные режимы обеспечили выход Fe(VI) 78%, что на 15% выше, чем в статических системах [7]. Эффективность удаления загрязнителей представлена в таблице 1.

Таблица 1 — Эффективность удаления загрязнителей ферратами (концентрация Fe(VI)=3–5 мг/л, рН=12, T=25°C)

Загрязнитель	Время обработки, мин	Эффективность, %	Энергопотребление, Вт·ч/л
Микропластик (полиэтилен, 100 мкм)	30	75	1,2
Амоксициллин	30	86	0,8
Метиленовый синий	15	96	0,5
Дрожжевые клетки	20	94	0,7

Удаление микропластика достигнуто за счет окисления (разрыв полимерных цепей) и коагуляции Fe(OH)_3 , что позволяет собирать осадок для рециклинга (например, пиролиза в топливо). Для амоксициллина деградация β -лактамного кольца подтверждена снижением поглощения при 272 нм. Метиленовый синий разрушался на 96% ($\lambda=664$ нм), а дрожжевые клетки агрегировались на 94% (OD_{600}). Энергозатраты минимальны (0,5–1,2 Вт·ч/л), что делает технологию рентабельной для регионов с ограниченными ресурсами.

Ограничения: низкая производительность (0,5 л/ч) и необходимость замены диафрагмы в минерализованных стоках. Однако модульность установки позволяет адаптировать ее для полигонов рециклинга полимеров, интегрируя с IoT-датчиками для онлайн-мониторинга pH и концентрации Fe(VI).

Таким образом, лабораторный генератор ферратов обеспечивает экологически безопасный рециклинг полимерных отходов путем удаления микропластика из водных сред с эффективностью 75–96%. Технология минимизирует токсичные побочные продукты, снижая риски для экосистем, и соответствует принципам устойчивого развития. Перспективы — масштабирование с возобновляемой энергией и автоматизацией, что расширит применение в текстильной и фармацевтической отраслях для обработки стоков с полимерными загрязнителями.

Литература

1. Sharma, V.K. Ferrate(VI) oxidation of selected emerging contaminants: Application to advanced wastewater treatment / V.K. Sharma et al. // Journal of Hazardous Materials. – 2022. – Vol. 434. – P. 128886.
2. Безреагентная технология интенсификации процесса выращивания микрозелени в аквапонных системах / В. Н. Штепа, С. Ю. Киреев, А. В. Козырь, А. Б. Шикунец // Химическая технология. – 2023. – Т. 24, № 5. – С. 194-200.
3. Kireev, S.Yu. Study of the Efficiency of Using an Electrochemical Module to Generate Ferrates while Treating Wastewater from Meat Processing Plants/ S.Yu. Kireev et al // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2024. – Vol. 58, No. 2. – P. 469–474.
4. Лабораторный генератор ферратов: конструкция, режимы, эффективность / С. Ю. Киреев, В. Н. Штепа, С. Н. Киреева [и др.] // Вестник Технологического университета. – 2025. – Т. 28, № 4. – С. 69-75..
5. Исследование эффективности использования AOPs и активированного угля для очистки коммунальных сточных вод / В. Н. Штепа, С. Ю. Киреев, А. В. Козырь [и др.] // Химическая технология. – 2025. – Т. 26, № 5. – С. 190-200.
6. Lee, Y. Microplastic Degradation by Advanced Oxidation Processes/ Y. Lee et al. // Water Research. – 2024. – Vol. 250. – P. 121234.
7. Kovalakova, P. Oxidation of antibiotics by ferrate(VI) in water: Evaluation of their removal efficiency and toxicity changes/ P.Kovalakova et al. // Chemosphere. – 2021. – Vol. 277. – P. 130365.