

С. Ю. Киреев, В. Н. Штепа, К. С. Шинкевич,  
В. А. Крылов, А. В. Козыр, А. Б. Шикунец

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФЕРРАТОВ БАРИЯ ДЛЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД МОЛОКОЗАВОДОВ, ОРГАНИЗАЦИЙ БЫТОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ НАСЕЛЕНИЯ, УСТАНОВОК ПО ВЫРАЩИВАНИЮ ГИДРОБИОНТОВ

Ключевые слова: феррат бария, AOPs, сточные воды, химическое потребление кислорода, окисление, биоцидный эффект.

Феррат бария – высокоэффективный и технологически сложный реагент для очистки сложных промышленных сточных вод. Это химическое соединение, в котором железо находится в максимальной степени окисления +6, что и характеризует его очень сильным окислителем. Феррат бария наиболее стабилен, чем, например, ферраты щелочных металлов, поэтому он является более перспективным реагентом для очистки сточных вод. В статье проанализированы недостатки современных подходов к очистке сточных вод, обоснована крайне высокая актуальность разработки новых технологий, которые бы позволили объединять сильные стороны различных способов очистки сточных вод, базируясь на подходах технологии AOPs, которая основана на получении в растворе очень мощного окислителя, такого как гидроксильный радикал ( $\bullet\text{OH}$ ), способного разрушать органические вещества вплоть до их минерализации. Данное исследование посвящено разработке методики использования феррата бария в качестве реагента для очистки реальных сточных вод установки по выращиванию гидробионтов, организации бытового обслуживания населения, молокозавода (после мойки технологического оборудования и MBR-реактора). Обоснована и разработана методика синтеза феррата бария. Ключевым этапом синтеза феррата бария является окисление гидроксида железа (III) бромом в щелочной среде с последующим осаждением раствором хлорида бария до феррата бария. Результаты очистки сточных вод с помощью синтезированного продукта продемонстрировали высокую редукцию по показателю «Химическое потребление кислорода» – порядка 80%; зафиксированы хорошие биоцидные свойства феррата бария после обработки им сточных вод мембранного биореактора молокозавода. Предложено акцентировать дальнейшие исследования на разработке технологической схемы производства феррата бария с максимальной локализацией.

S. Yu. Kireev, V. N. Shtepa, K. S. Shinkievich,  
V. A. Krylov, A. V. Kozyr, A. B. Shikunets

# USE OF BARIUM FERRATES FOR WASTEWATER PURIFICATION OF DAIRY FACTORIES, HOUSEHOLD SERVICES, HYDROBIANT FARMING INSTALLATIONS

Keywords: barium ferrate, AOPs, wastewater, chemical oxygen consumption, oxidation, biocidal effect.

Barium ferrate is a highly effective and technologically complex reagent for the treatment of complex industrial wastewater. It is a chemical compound in which iron is in its maximum oxidation state of +6, which makes it a very strong oxidizing agent. Barium ferrate is more stable than alkali metal ferrates, making it a more promising reagent for wastewater treatment. The article analyzes the shortcomings of modern approaches to wastewater treatment and substantiates the high relevance of developing new technologies that would allow combining the strengths of various wastewater treatment methods based on the AOPs technology approach, which is based on producing a very powerful oxidant in the solution, such as the hydroxyl radical ( $\bullet\text{OH}$ ), which can destroy organic matter up to its mineralization. This study is devoted to the development of a method for using barium ferrate as a reagent for the treatment of real wastewater from a hydrobiont cultivation facility, a household service organization, and a dairy plant (after washing the process equipment and the MBR reactor). A method for the synthesis of barium ferrate has been substantiated and developed. The key step in the synthesis of barium ferrate is the oxidation of iron (III) hydroxide with bromine in an alkaline environment, followed by precipitation with barium chloride solution to form barium ferrate. The results of wastewater treatment using the synthesized product demonstrated a high reduction in the indicator «Chemical oxygen consumption» – about 80%; good biocidal properties of barium ferrate were recorded after it treated wastewater from a dairy membrane bioreactor. It is proposed to focus further research on the development of a technological scheme for the production of barium ferrate with maximum localization.

## Введение

Оценка современных методов очистки сточных вод обосновывает, что они имеют ряд недостатков, среди которых ограниченная эффективность в удалении растворенных веществ, необходимость в сложных и энергоемких технологиях, а также потенциальные проблемы с образованием осадка и необходимостью его утилизации.

Так для физических способов к недостаткам можно отнести: не редуцируют растворенные веще-

ства и микроорганизмы; эффективны только для удаления больших и взвешенных частиц. Негативные аспекты применения физико-химических методов: могут быть дорогими из-за расхода электроэнергии и реагентов; нуждаются в комплексной автоматизации процессов, иначе эффективность очистки может значительно снизиться. Химические способы могут приводить к образованию токсичных побочных продуктов; при их применении часто имеет место значительное повышение общей минерализации при относительно незначительной эффективности удаления

загрязнителей. Биологические методы во многом зависят от условий окружающей среды (температура, pH, наличие кислорода); чувствительны к токсическим веществам в водных растворах.

Обобщая, можно выделить такие общие недостатки технологий обработки сточных вод: необходимость в сложных и дорогостоящих технологиях для достижения высокого качества очистки; потенциальная проблема образования экологически опасного осадка и необходимость его утилизации; значительная зависимость эффективности от качества исходной воды и условий эксплуатации; потребность в системном мониторинге и контроле процессов очистки.

Таким образом актуальной является задача создания технологических решений (их практического применения), которые бы объединяли положительные характеристики различных подходов и позволили реализовывать автоматизированные комплексы с наилучшими эколого-экономическими характеристиками [1, 2].

#### **Анализ перспективности использования при очистке сточных вод технологий AOPs**

Advanced Oxidation Process (AOPs) основана на получении гидроксильных свободных радикалов (HO<sup>•</sup>) и других высокорективных окислителей, которые являются сильными реагентами и способны к деструкции красителей, которые не могут быть разрушены традиционными подходами [3-6]. Сравнительные исследования показывают, что интеграция AOPs с биологической стадией позволяет значительно повысить степень удаления микрозагрязнителей. Например, в схеме биологической обработки с последующим озонированием было достигнуто более 90 % удаление карбамазепина, тогда как при одной лишь биологической очистке показатель не превышал 20 % [7]. Аналогично, при сравнении UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> с сорбцией на гранулированном активированном угле для удаления фенольных микрополлютантов, AOPs обеспечивала более 85 % разложения загрязнителя, в то время как сорбция позволила удалить лишь около 40 %, также при ее использовании не были разрушены сами поллютанты, а лишь аккумулялированы на адсорбенте, оставив открытым вопрос утилизации твердых отходов [8].

Однако, высокая эффективность AOPs сопряжена с повышенными эксплуатационными затратами, особенно при очистке больших объемов сточных вод с низкой концентрацией органики, где стоимость электроэнергии и реагентов становится важным фактором при выборе технологии [9].

Озонирование и фотолиз (комбинация УФ и H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) показывают наилучшие результаты только в растворах, которые имеют высокие показатели светопрозрачности и низкие концентрации взвешенных веществ. Группа технологий AOPs, основанная на электрохимических способах генерации окислителей является актуальной для локальных очистных сооружений с высокой минерализацией, данные технологии показывают высокую эффективность, однако имеют ряд технологических ограничений к применению и достаточно энергоёмкие [10-12].

В сравнении с сорбционными методами фильтрации AOPs не создают вторичного концентрата загрязнителей, а преобразовывают их в менее опасные формы, что снимает вопрос с утилизацией фильтрата [13].

Однако образование промежуточных токсичных продуктов (например, галогенорганики при озонировании в присутствии Br<sup>-</sup>/Cl<sup>-</sup>) требует дополнительных стадий доочистки [14]. Применение классического реактива Фентона (Fe<sup>2+</sup>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) в доочистке сточных вод фармацевтической промышленности показало удаление >95 % диклофенака, тогда как биологическая стадия в тех же условиях обеспечивала менее 30 % снижения концентрации [15-18].

AOPs в очистке сточных вод определяется не столько их абсолютной эффективностью, сколько способностью интегрироваться в комплексные технологические схемы, поскольку они имеют значительные ограничения, например, по наличию в водных растворах взвешенных частиц. Перспективными направлениями использования AOPs являются доочистка высококонцентрированных сточных вод локальных очистных сооружений и предобработки перед биологическими или мембранными процессами с целью повышения биоразлагаемости стоков.

#### **Экспериментальная часть**

##### **Методика проведения экспериментальных исследований**

В качестве модельных сточных вод использовались сточные воды:

- молокозавода после мытья технологического оборудования при условии нейтрального pH: феррат применялся, как реагент для первичной обработки (предобработки) СВ;
- организации бытового обслуживания населения: реагент применялся для химического окисления загрязнителей;
- установки по выращиванию гидробионтов (клариевого сома) – базовая очистка отводимых в канализацию сточных вод;
- молокозавода: при доочистке и обеззараживании СВ после мембранного биореактора (Membrane Bioreactor Reactor (MBR) – процесс водообработки, объединяющий мембранное разделение и технологии биологической очистки).

Доза внесения феррата бария – 15 мг/л.

После внесения выполнялось механическое перемешивание на протяжении 30 секунд; через 1 час выполнялся пробоотбор для анализа показателей качества СВ и микробиологической оценки.

Фиксировались следующие показатели качества водных растворов: pH, химическое потребление кислорода (ХПК) и мутность; проводился анализ микробиологических показателей доочистки СВ после MBR-реактора.

Водородный показатель pH измерялся при помощи pH метра «Аквилон pH-410» (предел основной абсолютной погрешности при измерении активности ионов водорода ± 0,05). Прибор калибруется в трех буферных растворах со значениями pH, равными

4,01; 6,86; 9,18. Далее электрод погружается в раствор и удерживается до стабилизации значений. Метод соответствует ГОСТ 26423-85 «Методы определения удельной электрической проводимости, pH и плотного остатка водной вытяжки».

Методика определения ХПК основана на окислении органических веществ бихроматом калия и последующем титровании солью Мора. Используется лабораторное оборудование: колбы, пипетки, весы, электроплитка. Диапазон измерений: 4-2000 мг/л (титриметрия) или 10-800 мг/л (фотометрия). Погрешность метода – до  $\pm 10\%$ . Методика соответствует ГОСТ 31859-2012 «Вода. Метод определения химического потребления кислорода».

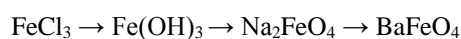
Мутность растворов измеряли при помощи портативного измерителя мутности «LH-Z10A» согласно его паспортным характеристикам. Нефелометрическая единица измерения мутности в NTU, погрешность  $\leq \pm 0,10$  NTU.

TDS (Total Dissolved Solids – указывает на общее количество растворенных в ней минералов, солей, металлов и других органических и неорганических веществ) определяли при помощи прибора для определения электропроводности «LH-N500». TDS в ppm; погрешность  $\pm 0,50\%$ .

Для определения количества мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов (КМАФАнМ) в водных растворах применяли метод посева жидкого образца на плотную питательную среду КМАФАнМ при помощи пипеточного дозатора. Чтобы минимизировать загрязнение проб извне, посев проводили в ламинарном боксе с использованием спиртовки для поддержания стерильности. Пробы воды транспортировали в стерильных одноразовых пластиковых контейнерах с герметичными крышками.

### Методика синтеза феррата бария

Схема синтеза феррата бария:



1. *Получение раствора хлорида железа (III)*: сначала растворяли 10,0 г  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  в 30 мл дистиллированной воды. Затем охлаждали раствор до  $5^\circ\text{C}$  в ледяной бане.

2. *Осаждение гидроксида железа (III)*: медленно добавляли 15% раствор  $\text{NH}_4\text{OH}$  (~25 мл) при перемешивании до pH = 9-10 (индикатор – фиолетовый лакмус). Далее выдерживали 15 мин при  $5^\circ\text{C}$ . Затем фильтровали осадок через воронку Бюхнера, и промыли  $3 \times 10$  мл ледяной воды. Результат: Коричневый гель  $\text{Fe(OH)}_3$  (влажный, ~7 г).

3. *Окисление  $\text{Fe(OH)}_3$  до  $\text{Na}_2\text{FeO}_4$* : сначала растворяли 50 г NaOH в 60 мл дистиллированной воды, далее охлаждали до  $0^\circ\text{C}$ . Для окисления собрали установку: закрепляли трёхгорлую колбу в штативе, под которую положили магнитную мешалку. В одно крайнее горло закрепили термометр, а в другое крайнее горло – делительную воронку, которую применяли для добавления брома по каплям. Затем перенесли влажный  $\text{Fe(OH)}_3$  в трёхгорлую колбу и далее

наливали охлажденный NaOH и интенсивно перемешивали магнитной мешалкой ( $0^\circ\text{C}$ ). После этого в вытяжном шкафу отобрали 8 мл брома в цилиндр, затем переносили его в делительную воронку, с помощью которой приливали бром по каплям (1 капля – 1 секунда). Контролировали температуру: не выше  $5^\circ\text{C}$ ! После всех действий закрыли резиновой пробкой третье горло. Перемешивали 45 мин до появления темно-красной окраски.

3. *Центрифугирование полученного раствора  $\text{Na}_2\text{FeO}_4$* : для этого в две пробирки наливали определённый объём раствора феррата натрия, а в другие две – такой же объём дистиллированной воды. Центрифугировали при 150 rpm 5 минут.

4. *Добавление к раствору феррата натрия раствор хлорида бария  $\text{BaCl}_2$* : к центрифугату добавляли 10% раствор  $\text{BaCl}_2$ . Затем поставили охлаждаться в холодильник.

5. *Центрифугирование раствора  $\text{BaFeO}_4$* : сначала отделяли надосадочную жидкость, а оставшуюся суспензию феррата бария центрифугировали при 150 rpm 5 минут. Центрифугат сливали в химический стакан, а осадок феррата бария переносили в чашку Петри небольшим добавлением дистиллированной воды. Накрыли чашку Петри крышкой.

6. *Сушка и хранение полученного феррата бария*: сушили до полного испарения воды, а затем переносили в бюкс полученный феррат бария.

### Результаты исследований и их обсуждение

Оценка эффективности редукции интегрального показателя наличия органических загрязнителей ХПК демонстрирует значимую эффективность (рис. 1).

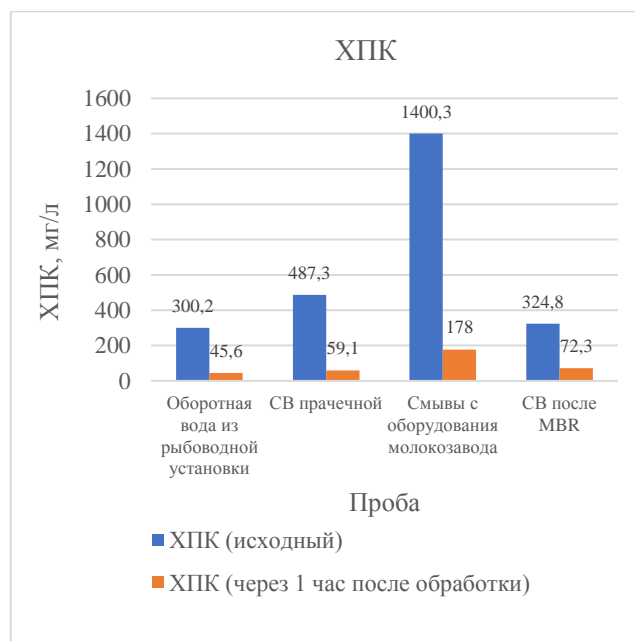


Рис. 1 – Эффективность очистки сточных вод по показателю «Химическое потребление кислорода»

Fig. 1 – Efficiency of wastewater treatment based on the Chemical Oxygen Demand indicator

Использование феррата бария позволило достичь значительной эффективности редукции органических загрязнителей. Наибольший эффект (редукция 87,9%) достигнут при обработке сточных вод после предприятия по стирке одежды и белья. Также высокая очистки от органических загрязнителей зафиксирована при обработке СВ после мойки оборудования молокозаводов – 87,2%, здесь имел место кроме окислительного воздействия и значительный эффект коагуляции, после формирования в растворе гидроксидов железа.

Наименьший эффект (редукция 77,7%) имел место после обработки водных растворов, выходящих из MBR-реакторов, что объясняется уже прохождением этой сточной воды через флотационную установку (физико-химическое воздействие) и непосредственно биологическую обработку. Оставшиеся органические загрязнители во многом можно классифицировать, как «трудноокисляемые» и для их удаления необходимы более высокие дозы феррата бария.

Применение синтезированного продукта позволило добиться также и осветления сточных вод (рис. 2).

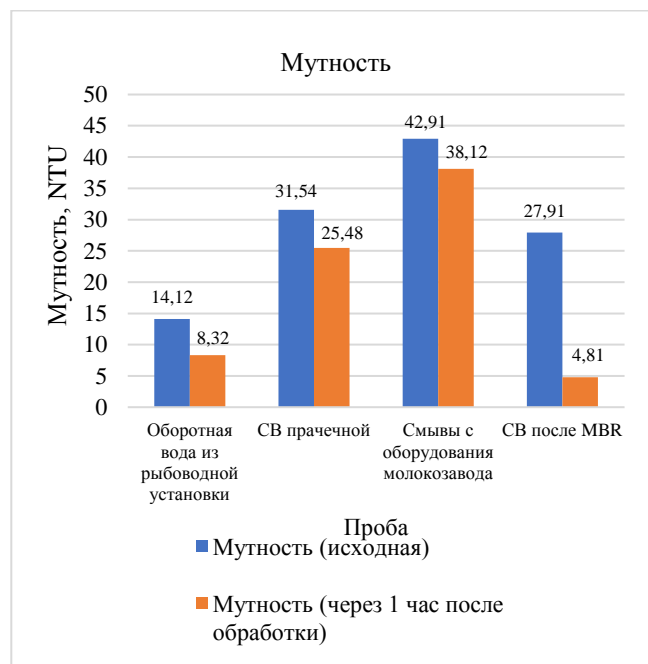


Рис. 2 – Эффективность осветления сточных вод

Fig. 2 – Efficiency of wastewater clarification

Наибольшую продуктивность по повышению светопропускающей способности загрязнённых водных растворов (см. рис. 2) продемонстрировала обработка СВ после MBR-реактора – редукция 82,8%, наименьшую – очистка продуктов мойки технологического оборудования молокозавода – 11,1%. Последнее можно пояснить большим исходным значением ХПК воды (более 1400 мг  $O_2$ /л) и расходованием большей часть синтезированного продукта на удаление именно органической компоненты поллютантов и его недостаточностью для повышения прозрачности СВ.

К положительным результатам применения рабочих доз феррата бария можно отнести приемлемые

амплитудные колебания значений pH сточных вод после внесения реагента и незначительное повышение TDS (рис. 3).

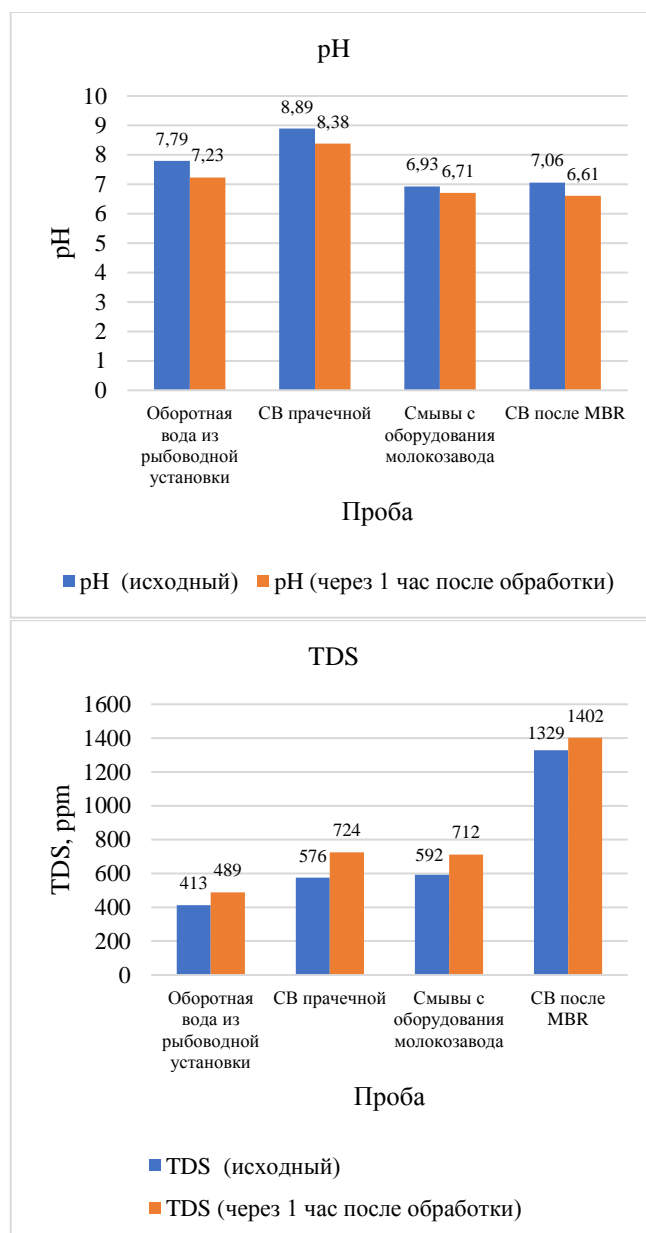


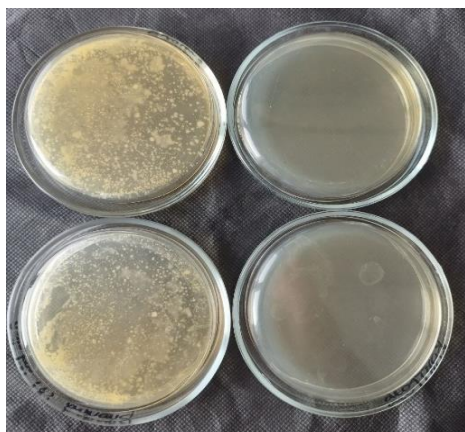
Рис. 3 – Результаты изменения pH и TDS после очистки сточных вод

Fig. 3 – Results of pH and TDS changes after wastewater treatment

Колебания pH сточных вод во многом определяются значительными буферными свойствами реальных сточных вод производственных объектов.

Незначительное повышение TDS (см. рис. 3) можно пояснить тем, что имел место противоположный процесс: повышение его неорганической составляющей и уменьшение растворённой органической компоненты (в результате окислительного воздействия).

Обработка сточных вод после MBR-реактора молокозавода ферратом бария также показала его бицидные свойства (рис. 4).



**Рис. 4 – Бицидная эффективность феррата бария после обработки сточных вод MBR-реактора молокозавода**

**Fig. 4 – Biocidal efficiency of barium ferrate after treatment of milk factory wastewater in an MBR reactor**

Так после 24 часов роста при 37 °С наблюдались отдельные колонии в большом количестве, однако зон сплошного роста обнаружено не было, что говорит о возможности использования данного соединения не только как окислителя, но и как дезинфектанта (см. рис. 4).

### Выводы

1. Очистка сточных вод молокозаводов, организаций бытового обслуживания населения, установок по выращиванию гидробионтов при применении феррата бария продемонстрировали высокую редукцию по показателю «Химическое потребление кислорода» – порядка 80%; не столь высокий эффект по повышению светопропускаемости загрязнённых водных растворов (в большинстве вариантов обработке порядка 20%) можно объяснить недостаточностью рабочей дозы.

2. С позитивной стороны использования феррата бария можно отнести приемлемые колебания амплитудных значений pH сточных вод после внесения реагента и незначительное повышение TDS, которые вызываются высокой буферной емкостью реальных сточных вод и высокопродуктивным удалением растворённых органических загрязнителей, соответственно.

3. Результат исследования микробиологических параметров сточных вод после MBR-реактора молокозавода, выполненные на основе определения количества мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов в водных растворах, продемонстрировали наличие хороших бицидных свойств у феррата бария.

4. Обосновано дальнейшие исследования нацелить на разработку технологии синтеза феррата бария в промышленных условиях с максимальной локализацией и выполнением подходов «in-situ» (по месту).

### Литература

1. С.Ю. Киреев, В.Н. Штепа, С.Н. Киреева, А.В. Дубина, Ю.Н. Кирилина, В.А. Крылов, *Вестник технологического университета*, **28**, 4, 69-75 (2025). DOI: 10.55421/3034-4689\_2025\_28\_4\_69.

2. С. Ю. Киреев, В. Н. Штепа, С. Н. Киреева, А. В. Козыр, А. Б. Шикунец, Л. В. Наумов, *Хим. технол.*, **25**, 2, 67-73 (2024). DOI:10.31044/1684-5811-2024-25-2-67-73.

3. J. Lee, U. von Gunten, Jae-Hong Kim, *Environ. Sci. Technol.*, **54**, 6, 3064-3081 (2020). DOI: 10.1021/acs.est.9b07082.

4. M. A. Oturan, J.-J. Aaron, *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, **44**, 23, 2577-2641 (2014). DOI:10.1080/10643389.2013.829765.

5. S. Hammami, M. A. Oturan, N. Oturan, N. Bellakhal, M. Dachraoui, **45**, 1-3, 297-304 (2012). DOI:10.1080/19443994.2012.692059.

6. M. A. Oturan, E. Brillas, *Port. Electrochim. Acta*, **25**, 1, 1-18 (2007). DOI:10.4152/pea.200701001.

7. M. F. Chislock, O. Sarnelle, L. M. Jernigan, A. E. Wilson, *Water Research*, **47**, 6, 1961-1970 (2013). DOI: 10.1016/j.watres.2012.12.038.

8. A. Bargellini, I. Marchesi, E. Righi, A. Ferrari, S. Cencetti, P. Borella, S. Rovesti, *Water Research*, **45**, 6, 2315-2321 (2011). DOI: 10.1016/j.watres.2011.01.009.

9. X. Zhang, Y. Li, J. Wang, H. Chen, Z. Liu, *Chemosphere*, **287**, 131 (2021).

10. M. Rodríguez-Peña, R. Natividad, C. E. Barrera-Díaz, P. B. Hernández, Claudia I. Alanis Ramírez, G. Roa-Morales, *Int. J. Electrochem. Sci.*, **19**, 7, 1-18 (2024). DOI:10.1016/j.ijoes.2024.100589.

11. A.P. Petkova, R. E. Nekrasov, V. A. Dyachenko, M. V. Brunman, *Earth Environ. Sci.* **539** (2020). DOI: 10.1088/1755-1315/539/1/012029.

12. E. Brillas, J.A. Garrido, R. M. Rodríguez, C. Arias, P. L. Cabot, F. Centellas, *Port. Electrochim. Acta*, **26**, 1, 15-46 (2008). DOI:10.4152/pea.200801015.

13. Y. Wang, L. Li, H. Dong, Q. Wang, S. Liu, M. Wu, J. Yu, Z. Qiang, *Chem. Eng. J.*, **465**, 10, 142 (2023). DOI:10.1016/j.ccej.2023.142875.

14. J. Lee, U. von Gunten, J.-H. Kim, *Environ. Sci. Technol.*, **54**, 6, 3064-3081 (2020). DOI: 10.1021/acs.est.9b07082.

15. M. N. Chong, B. Jin, C. W. Chow, C. Saint, *Chem. Eng. J.*, **95**, 1-3, 259-269 (2004).

16. Philip C.W. Cheung, D.R. Williams, J. Barrett, J. Barker, D. W. Kirk, *Molecules*, **26**, 17 (2021). DOI: 10.3390/molecules26175266.

17. E. C. Muñoz, G. Tseberlidis, A. H. Husien, S. Binetti, F. Gosetti, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, (2025) **32**, 21, 12700-12712 (2025). DOI: 10.1007/s11356-025-36466-5.

18. А. В. Желовицкая, А. Ф. Дресвянников, О. Г. Чудакова, *Вестник технологического университета*, **18**, 20, 73-79 (2015).

### References

1. S.Y. Kireev, V.N. Shtepa, S.N. Kireeva, A.V. Dubina, Yu.N. Kirilina, V.A. Krylov, *Herald of Technological University*, **28**, 4, 69-75 (2025). DOI: 10.55421/3034-4689\_2025\_28\_4\_69.

2. 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). DOI:10.31044/1684-5811-2024-25-2-67-73.

3. J. Lee, U. von Gunten, Jae-Hong Kim, *Environ. Sci. Technol.*, **54**, 6, 3064-3081 (2020). DOI: 10.1021/acs.est.9b07082.

4. M. A. Oturan, J.-J. Aaron, *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, **44**, 23, 2577-2641 (2014). DOI:10.1080/10643389.2013.829765.

5. S. Hammami, M. A. Oturan, N. Oturan, N. Bellakhal, M. Dachraoui, **45**, 1-3, 297-304 (2012). DOI:10.1080/19443994.2012.692059.

6. M. A. Oturan, E. Brillas, *Port. Electrochim. Acta*, **25**, 1, 1-18 (2007). DOI:10.4152/pea.200701001.

7. M. F. Chislock, O. Sarnelle, L. M. Jernigan, A. E. Wilson, *Water Research*, **47**, 6, 1961-1970 (2013). DOI: 10.1016/j.watres.2012.12.038.



8. A. Bargellini, I. Marchesi, E. Righi, A. Ferrari, S. Cencetti, P. Borella, S. Rovesti, *Water Research*, **45**, 6, 2315-2321 (2011). DOI: 10.1016/j.watres.2011.01.009
9. X. Zhang, Y. Li, J. Wang, H. Chen, Z. Liu, *Chemosphere*, **287**, 131 (2021).
10. M. Rodríguez-Peña, R. Natividad, C. E. Barrera-Díaz, P. Balderas Hernández, Claudia I. Alanis Ramírez, G. Roa-Morales, *Int. J. Electrochem. Sci.*, **19**, 7, 1-18 (2024). DOI:10.1016/j.ijoes.2024.100589
11. A.P. Petkova, R. E. Nekrasov, V. A. Dyachenko, M. V. Brunman, *Earth Environ. Sci.* **539** (2020). DOI: 10.1088/1755-1315/539/1/012029
12. E. Brillas, J.A. Garrido, R. M. Rodríguez, C. Arias, P. L. Cabot, F. Centellas, *Port. Electrochim. Acta*, **26**, 1, 15-46 (2008). DOI:10.4152/pea.200801015
13. Y. Wang, L. Li, H. Dong, Q. Wang, S. Liu, M. Wu, J. Yu, Z. Qiang, *Chem. Eng. J.*, **465**, 10, 142 (2023). DOI:10.1016/j.cej.2023.142875
14. J. Lee, U. von Gunten, J.-H. Kim, *Environ. Sci. Technol.*, **54**, 6, 3064-3081 (2020). DOI: 10.1021/acs.est.9b07082
15. M. N. Chong, B. Jin, C. W. Chow, C. Saint, *Chem. Eng. J.*, **95**, 1-3, 259-269 (2004).
16. Philip C.W. Cheung, D.R. Williams, J. Barrett, J. Barker, D. W. Kirk, *Molecules*, **26**, 17 (2021). DOI: 10.3390/molecules26175266
17. E. C. Muñoz, G. Tseberlidis, A. H. Husien, S. Binetti, F. Gosetti, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, (2025) **32**, 21, 12700-12712 (2025). DOI: 10.1007/s11356-025-36466-5
18. A. V. Zhelovitskaya, A. F. Dresvyannikov, and O. G. Chudakova, *Herald of Technological University*, **18**, 20, 73-79 (2015).

---

© **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; **В. Н. Штепа** – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой Промышленной экологии, Белорусский государственный технологический университет (БГТУ), Минск, Республика Беларусь, shtepa@belstu.by; **К. С. Шинкевич** – студент кафедры Промышленной экологии, БГТУ; **В. А. Крылов** – ведущий инженер-технолог ООО «Маяк-Техноцелл», Пенза, Россия; аспирант кафедры «Химия», ПГУ, vlad09082014@mail.ru, VKrylov@mayak-technocell.com; **А. В. Козыр** – старший преподаватель кафедры Аквакультуры и дизайна экосреды (АДЭ), Полесский государственный университет (Полесский ГУ), Пинск, Республика Беларусь, kozyr.a@polessu.by; **А. Б. Шикунец** – ассистент кафедры АДЭ, Полесский ГУ, shikunets.a@polessu.by.

© **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; **Sh. V. Nikolaevich** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Associate Professor, Head of the Department of Industrial Ecology, Belarusian State Technological University (BSTU), Minsk, Republic of Belarus, shtepa@belstu.by; **K. S. Shinkevich** – Student of the Department of Industrial Ecology, BSTU; **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; **A. V. Kozyr** – Senior Lecturer of the Department of Aquaculture and Environmental Design (AED), Polessky State University (Polessky SU), Pinsk, Republic of Belarus, kozyr.a@polessu.by; **A. B. Shikunets** – Assistant of the AED department, Polessky SU, shikunets.a@polessu.by.

Дата поступления рукописи в редакцию – 23.09.25.

Дата принятия рукописи в печать – 26.11.25.