

**ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЕРОКСОДИСУРНОЙ КИСЛОТЫ
В ПРОЦЕССАХ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД, СОДЕРЖАЩИХ
СИНТЕТИЧЕСКИЕ КРАСИТЕЛИ****Т.Г. Любушкин, Е.Н. Кузин, Н.А. Иванцова, Т.В. Конькова**

Тимофей Геннадьевич Любушкин (ORCID 0009-0000-0839-5260)*, Евгений Николаевич Кузин (ORCID 0000-0003-2579-3900), Наталья Андреевна Иванцова (ORCID 0000-0003-4117-072X)

Кафедра промышленной экологии, Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Миусская пл. 9, Москва, Российская Федерация, 125047

E-mail: timlub2000@gmail.com*, kuzin.e.n@muctr.ru, ivantsova.n.a@muctr.ru

Татьяна Владимировна Конькова (ORCID 0000-0002-7151-6317)

Кафедра технологии неорганических веществ и электрохимических процессов, Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Миусская пл. 9, Москва, Российская Федерация, 124047
E-mail: kontat@list.ru

Вопросам очистки сточных вод от органических экотоксикантов посвящено множество работ, при этом поиск альтернативных реагентов и технологий их деструкции вследствие ограничений и недостатков классических способов остается актуальным. Из-за активного роста темпов производства и потребления и сильного негативного воздействия на окружающую среду крайне серьезной экологической проблемой является загрязнение природных водоемов сточными водами, содержащими синтетические красители. В качестве альтернативы традиционным методам озонирования и хлорирования в статье рассматривается возможность применения пероксодисурной кислоты ($H_2S_2O_8$) как перспективного окислителя синтетических красителей в сточных водах на примере модельных загрязняющих веществ: фуксина, метиленового голубого, бромкрезолового зеленого, метилового красного и родамина С. Установлено, что в чистом виде пероксодисурная кислота окисляет не более 40% от массы красителя, при этом введение в систему в качестве катализатора соединений железа (II) повышает степень деструкции до 90%. Определены оптимальные дозы окислителя и катализатора, рассчитаны скорости деструкции. Отмечено, что увеличение дозы окислителя и катализатора сверх оптимальной снижают эффективность деструкции. Совместное применение соединений железа и пероксодисурной кислоты позволяет ускорить процессы деструкции метилового красного в 5 раз, метиленового голубого – в 10 раз, родамина С – в 18 раз, бромкрезолового зеленого – в 58 раз и фуксина – в 3 раза по сравнению с индивидуальной $H_2S_2O_8$. Полученные данные свидетельствуют о высокой перспективности применения системы $H_2S_2O_8$ -Fe(II) в процессах окисления органических красителей в сточных водах.

Ключевые слова: окислительная деструкция, пероксодисурная кислота, синтетический краситель

Для цитирования:

Любушкин Т.Г., Кузин Е.Н., Иванцова Н.А., Конькова Т.В. Оценка возможности использования пероксодисурной кислоты в процессах очистки сточных вод, содержащих синтетические красители. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2025. Т. 68. Вып. 1. С. 120–126. DOI: 10.6060/ivkkt.20256801.7124.

For citation:

Liubushkin T.G., Kuzin E.N., Ivantsova N.A., Konkova T.V. Assessment of the possibility of using peroxodisuluric acid in the treatment processes of wastewater containing synthetic dyes. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2025. V. 68. N 1. P. 120–126. DOI: 10.6060/ivkkt.20256801.7124.

ASSESSMENT OF THE POSSIBILITY OF USING PEROXODISULFURIC ACID IN THE TREATMENT PROCESSES OF WASTEWATER CONTAINING SYNTHETIC DYES

T.G. Liubushkin, E.N. Kuzin, N.A. Ivantsova, T.V. Konkova

Timofei G. Liubushkin (ORCID 0009-0000-0839-5260)*, Evgenii N. Kuzin (ORCID 0000-0003-2579-3900), Natalya A. Ivantsova (ORCID 0000-0003-4117-072X)

Department of Industrial Ecology, D.I. Mendeleev University of Chemical Technology, Miusskaya sqr., 9, Moscow, 125047, Russia

E-mail: timlub2000@gmail.com*, kuzin.e.n@muctr.ru, ivantsova.n.a@muctr.ru

Tatyana V. Konkova (ORCID 0000-0002-7151-6317)

Department of Technology of Inorganic Substances and Electrochemical Processes, D.I. Mendeleev University of Chemical Technology, Miusskaya sqr., 9, Moscow, 125047, Russia

E-mail: kontat@list.ru

Many works have been devoted to the issues of wastewater treatment from organic ecotoxigants, while the search for alternative reagents and technologies for their destruction due to the limitations and disadvantages of classical methods remains relevant. Due to the active growth of production and consumption rates and the strong negative impact on the environment, pollution of natural water sources with wastewater containing synthetic dyes is an extremely serious environmental problem. As an alternative to traditional methods of ozonation and chlorination, the article considers the possibility of using peroxodisulfuric acid ($H_2S_2O_8$) as a promising oxidant of synthetic dyes in wastewater using the example of model pollutants: fuchsin, methylene blue, bromocresol green, methyl red and rhodamine C. It was found that in pure form peroxodisulfuric acid oxidizes no more than 40% by weight of the dye, but the introduction of iron (II) compounds as catalyst into the system increases the degree of destruction by up to 90%. The optimal doses of the oxidant and the catalyst were determined, and the rates of destruction were calculated. It is noted that an increase in the dose of the oxidant and catalyst above the optimal one reduces the efficiency of destruction. The combined use of iron compounds and peroxodisulfuric acid makes it possible to accelerate the destruction of methyl red by 5 times, methylene blue by 10 times, rhodamine C by 18 times, bromocresol green by 58 times and fuchsin by 3 times compared with individual $H_2S_2O_8$. The data obtained indicate the high prospects of using the $H_2S_2O_8$ -Fe(II) system in the processes of oxidation of organic dyes in wastewater.

Keywords: oxidative destruction, peroxodisulfuric acid, synthetic dye

ВВЕДЕНИЕ

Вопросам очистки сточных вод от различных экотоллютантов уделяется все больше внимания. Синтетические красители, попадая в окружающую среду, наносят серьезный ущерб экосистемам, при этом особенности строения не позволяют удалять их из воды традиционными методами, такими как коагуляция, ультрафиолетовое (УФ) или биологическое окисление. Применение методов химического окисления позволяет с высокой эффективностью минерализовать большую часть красителей. Синтетические красители повсеместно применяются как в быту, так и в промышленности. Именно на долю промышленных синтетических красителей приходится до 70% колорантов [1]. В среднем до 10-15 % масс. красителей, используемых в текстильных, лакокрасочных и целлюлозно-

бумажных производствах, вследствие недостаточной очистки сточных вод или ее полного отсутствия попадает в окружающую среду [2, 3]. Загрязнение природных водоемов синтетическими красителями снижает концентрацию растворенного кислорода в воде, препятствует проникновению солнечного света, что негативно сказывается на жизнедеятельности гидробионтов [4]. Синтетические красители также характеризуются крайне низкой биоразлагаемостью, высокой устойчивостью в окружающей среде и способностью к образованию токсичных полупродуктов, а также ярко выраженной биоаккумуляцией в трофических цепях.

Условно, все известные способы очистки сточных вод от синтетических красителей можно разделить на биологические (аэробные и анаэробные процессы), физико-химические (коагуляция, флокуляция, мембранная сепарация, сорбция и

т.д.) и химические методы (окисление, усовершенствованные окислительные процессы) [5-7].

Несмотря на то, что с помощью модифицированных биологических методов теоретически возможно достигнуть высокой степени минерализации [8], они мало распространены в сфере очистки окрашенных сточных вод из-за сложностей, связанных с высокой устойчивостью молекул красителей, длительностью процесса биodeградации (более 24 ч), высокой нестабильностью параметров сточных вод (концентрация красителей и других загрязняющих веществ, pH, температура и др.). Также отмечается, что в ходе биологической очистки возможно образование токсичных метаболитов жизнедеятельности микроорганизмов, таких как бензидин и ароматические амины [9].

Методы коагуляции и флокуляции традиционно применяются для удаления взвешенных веществ, что также в отдельных случаях может быть использовано для удаления красителей дисперсной или эмульсионной природы [10, 11], однако минерализация органических синтетических красителей коагулянтами невозможна и эффективность очистки остается на крайне низком уровне (менее 10%) [12]. Адсорбционные и абсорбционные методы в большинстве случаев позволяют достичь эффективности очистки, превышающей 90-95% [13], однако они сопряжены с проблемами, связанными с необходимостью регенерации или утилизации отработанных сорбентов.

Химические способы очистки главным образом представлены методами окисления и усовершенствованными окислительными процессами AOPs (Advanced Oxidation Processes). Традиционно для методов окисления применяются O_3 , Cl_2 , ClO_2 , H_2O_2 и др. Наиболее серьезный недостаток традиционного окисления – неполная минерализация сложных органических веществ, сопровождающаяся образованием полупродуктов, токсичность которых может быть выше, чем у исходных загрязняющих веществ [14]. Ограничения традиционных методов окисления такие как высокая стоимость, недостаточная эффективность, энергоемкость, образование отходов и т.д. привели к активному развитию высокоинтенсивных окислительных процессов (AOPs – Advanced Oxidation Processes) [15-18].

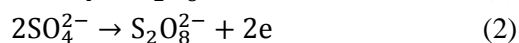
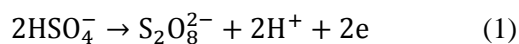
Наиболее современным и перспективным направлением развития AOPs являются SR-AOPs (Sulfate Radical based Advanced Oxidation Processes). Основное преимущество SR-AOP перед традиционными AOPs, основанными на образовании гидроксил-радикалов, заключается в большем окисли-

тельном потенциале и времени жизни сульфат-радикалов, что значительно повышает эффективность очистки [19-21]. Одним из основных реагентов, используемых в качестве источника сульфат-радикалов в SR-AOPs, является пероксодисерная кислота ($H_2S_2O_8$).

Основной целью данного исследования является оценка возможности применения пероксодисерной кислоты для очистки сточных вод, содержащих синтетические красители.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В промышленной и лабораторной практике основным способом получения пероксодисерной кислоты является метод электрохимического окисления концентрированных растворов серной кислоты. В ходе электролиза протекают реакции, описанные уравнениями 1 и 2 [22].



Под воздействием электрического тока происходит образование пероксидного мостика, наличие которого обуславливает выраженные окислительные свойства пероксодисерной кислоты [23].

Для проведения данного исследования были использованы образцы пероксодисерной кислоты, полученные в РХТУ им. Д.И. Менделеева на кафедре технологии неорганических веществ и электрохимических процессов.

В качестве тестовых поллютантов были выбраны следующие синтетические красители (рис. 1):

- Фуксин – краситель фиолетового цвета, ранее применявшийся для окрашивания текстиля, изготовления чернил, в настоящее время используется в качестве фунгицида и для окрашивания клеток в микробиологии [24, 25] (Ф);
- Бромкрезоловый зеленый – применяется для окрашивания тканей, в медицине для определения альбумина в крови, а также для маркировки молекул ДНК и микроорганизмов [26, 27] (БЗ);
- Метиленовый голубой – краситель синего цвета, применяемый для окрашивания тканей, кожи, бумаги, а также в медицинских целях для лечения анемии, малярии, резистентной гипотонии и некоторых других заболеваний [28, 29] (МГ);
- Метиловый красный – относится к группе азокрасителей и применяется в печати и текстильной промышленности [30] (МК);
- Родамин С – на сегодняшний день в основном применяется в аналитических целях в биотехнологии благодаря способности флуоресцировать, а также для изготовления чернил [31] (РС).

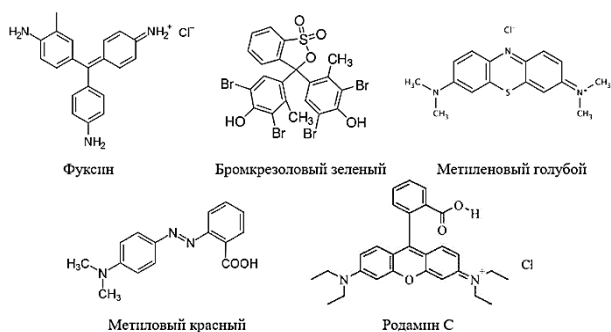
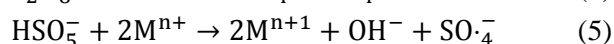
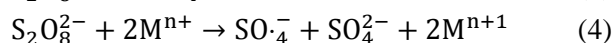


Рис. 1. Структурные формулы выбранных синтетических красителей

Fig. 1. Structural formulas of selected synthetic dyes

Согласно литературным данным, эффективность деструкции органических веществ с помощью пероксодисерной кислоты и ее солей значительно увеличивается при активации с помощью ультрафиолетового излучения, нагревания, ультразвукового воздействия, электрического тока и катализаторами на основе переходных металлов, благодаря наличию сульфат-радикалов, образующихся по реакциям 3-5 [32].



В данном исследовании, вследствие простоты осуществления и дальнейшего промышленного внедрения, активация процесса разложения пероксодисерной кислоты с образованием сульфат-радикалов проводилась с помощью раствора двухвалентного железа. Выбор катализатора обусловлен тем, что железо (II) эффективно применяется для реализации процесса Фентона [33], не образует токсичных соединений, а его окисленные формы хорошо удаляются из очищенной воды в процессе седиментации или фильтрации.

Начальная и конечная концентрации красителей определялись прямым фотометрическим методом на приборе ЗОМС КФК-3-01 (Россия).

В заданный объем модельной сточной воды при постоянном перемешивании вводили различные дозировки окислителя (2,5-10 мг окислителя/мг поллютанта) и варьировали концентрацию катализатора разложения пероксидисерной кислоты – двухвалентного железа (1,67-6,67 мг активатора/мг поллютанта). Начальная концентрация модельных загрязняющих веществ для каждого опыта составляла 3 мг/л.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе исследования для каждого из красителей были определены оптимальные дозы

пероксодисерной кислоты при контакте на протяжении 30 мин. Результаты представлены в табл. 1.

Как видно из данных табл. 1, средняя эффективность окисления (степень обесцвечивания раствора красителя) пероксодисерной кислотой в отсутствие катализатора составляет: 12% для фуксина, 13% для бромкрезолового зеленого, 7% для метиленового голубого, 33% для метилового красного и 29% для родамина С.

Таблица 1

Эффективность деструкции красителей пероксодисерной кислотой, %

Table 1. Dye destruction efficiency using peroxodisulfuric acid, %

Доза $\text{H}_2\text{S}_2\text{O}_8$, мг/мг	Краситель				
	Ф	БЗ	МГ	МК	РС
2,5	4,6	7,4	5,1	36,8	16,9
5	11,9	14,1	7,6	33,1	30,2
7,5	16,6	11,7	6,9	32,3	32,8
10	14,9	19,2	8,5	29,4	36,5

Снижение эффективности проводимой очистки после преодоления оптимальной дозы окислителя может быть связано с изменением механизма гидролиза и образованием менее сильного окислителя пероксида водорода, в сравнении с пероксосульфат радикалом. Принимая во внимание тот факт, что эффективность окисления не превышает 40%, было принято решение о необходимости использования катализатора разложения пероксодисерной кислоты и интенсификации образования сульфат-радикалов.

На следующем этапе исследования были определены оптимальные дозы катализатора (время контакта 30 мин). Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2

Эффективность деструкции красителей оптимальными дозами $\text{H}_2\text{S}_2\text{O}_8$ при добавлении Fe^{2+} , %

Table 2. Dye destruction efficiency by optimal dosage of $\text{H}_2\text{S}_2\text{O}_8$ in presence of Fe^{2+} , %

Доза Fe^{2+} , мг/мг	Краситель				
	Ф	БЗ	МГ	МК	РС
1,67	50,9	89,6	58,6	57,9	40,8
3,33	63,1	71,2	95,3	48,0	75,0
5	61,1	74,7	86,6	46,8	74,6
6,67	59,3	87,2	94,7	46,3	64,2

Согласно приведенным в табл. 2 данным, добавление железа (II) значительно повышает эффективность деструкции синтетических красителей пероксодисерной кислотой. Снижение эффективности окисления после преодоления оптимальной дозы катализатора вероятнее всего объясняется

протеканием побочных процессов между $H_2S_2O_8$ и Fe^{2+} (например, прямым окислением железа).

Наибольшая степень деструкции красителя была достигнута для метиленового голубого (95,3%). Высокая эффективность его разложения объясняется наименьшей молекулярной массой (кроме метилового красного) и простой структурой молекулы. Невысокая эффективность очистки (57,9%) как при использовании катализатора, так и при его отсутствии наблюдается в модельных растворах метилового красного, что может быть связано с наличием азо-связи $N=N$, обладающей высокой устойчивостью.

Для расчета габаритов очистных сооружений необходимо установление оптимального времени контакта краситель:окислитель, ввиду чего был проведен эксперимент по оценке влияния времени контакта на степень минерализации (деструкции) выбранных поллютантов. Полученные данные представлены на рис. 2 (пероксодисерная кислота в отсутствие катализатора) и рис. 3 (в присутствии катализатора разложения).

Из данных рис. 2 и рис. 3 видно, что с увеличением времени обработки концентрация красителя экспоненциально уменьшается, независимо от вида обработки.

Скорость окисления красителей при условии постоянства объема рассчитывали по уравнению (6):

$$r = -\frac{dc}{dt} \quad (6)$$

где t – время окисления, мин; c – концентрация красителя, мг/л.

Экспериментальные кинетические кривые (рис. 2 и 3) аппроксимировались исходя из уравнения (7):

$$y = a \cdot e^{(-x/b)} + c \quad (7)$$

где a , b , c – константы аппроксимации.

Скорости процесса рассчитывались для начального момента времени, поскольку в течение эксперимента могут проходить вторичные реакции, влияющие на процесс окисления. Начальная скорость превращения (r_0) определяется как значение производной данной функции при $t = 0$, что для выбранной зависимости совпадает со значением константы a . В случае рассмотрения систем, способных окислять краситель до проведения очистки, скорость процесса окисления пересчитывалась на 3 мг/л для сопоставления исходя из

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{a}{b} \cdot e^{(-x/b)} \quad (8)$$

$$r_0 = \frac{a}{b} \cdot e^{(0/b)} = \frac{a}{b} \quad (9)$$

На основании полученных данных были рассчитаны скорости реакции окисления различных красителей как индивидуальной пероксодисерной кислотой, так и системой с катализатором разложения. Полученные результаты представлены в табл. 3.

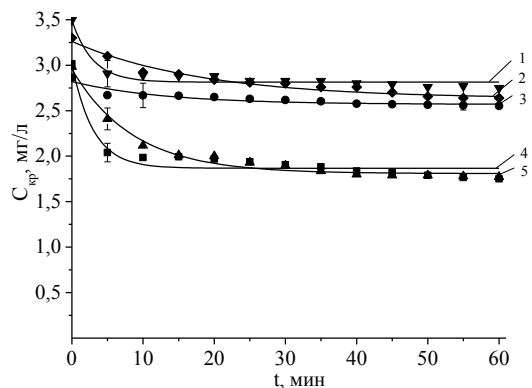


Рис. 2. Кинетика окисления пероксодисерной кислотой бромкрезолового зеленого (1), фуксина (2), метиленового голубого (3), метилового красного (4), родамина С (5)
Fig. 2. Kinetics of oxidation of bromocresol green (1), fuchsin (2), methylene blue (3), methyl red (4), rhodamine C (5) by peroxodisulfuric acid

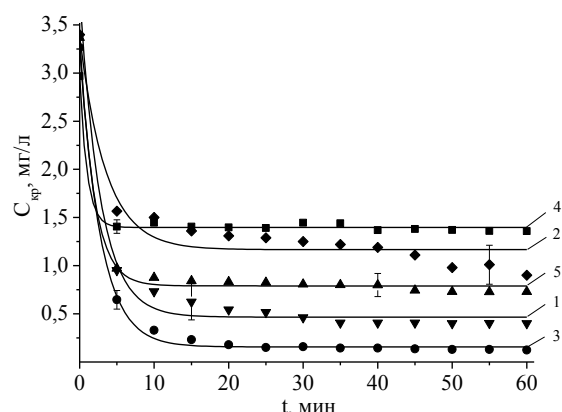


Рис. 3. Кинетика окисления пероксодисерной кислотой в присутствии железа (II) бромкрезолового зеленого (1), фуксина (2), метиленового голубого (3), метилового красного (4), родамина С (5)
Fig. 3. Kinetics of oxidation of bromocresol green (1), fuchsin (2), methylene blue (3), methyl red (4), rhodamine C (5) by peroxodisulfuric acid in presence of iron (II)

Таблица 3

Скорости (r , мг/л·мин) окисления красителей
Table 3. Rates (r , $mg L^{-1} min^{-1}$) of dye oxidation

В-ва	Краситель				
	Ф	БЗ	МГ	МК	РС
$H_2S_2O_8$	0,481	0,019	0,136	0,234	0,034
$H_2S_2O_8$ и Fe^{2+}	1,583	1,105	1,337	1,208	0,627

Анализируя данные табл. 3, видно, что введение железа (II) в систему ускоряет процессы де-

струкции метилового красного в 5 раз, метиленового голубого – в 10 раз, родамина С – в 18 раз, бромкрезолового зеленого – в 58 раз и фуксина – в 3 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование показывает, что пероксодисерная кислота может быть эффективно использована для очистки сточных вод, загрязненных синтетическими красителями.

Полученные данные доказывают, что использование катализатора на основе переходного металла (железа) повышает эффективность проводимой окислительной деструкции на 36% для фуксина, на 72% для бромкрезолового зеленого, на 86% для метиленового голубого, на 29% для метилового красного и на 66% для родамина С.

Анализ кинетики обесцвечивания красителей показал, что в присутствии железа (II) происходит не только значительное повышение эффективности очистки, но и повышение скорости процесса, что позволяет снизить время окисления.

Дальнейшее изучение свойств пероксодисерной кислоты и активации ее распада с образованием радикалов может позволить повысить эффективность удаления синтетических красителей из сточных вод. Авторами выдвинуто предположение о возможности ее применения для очистки сточных вод, содержащих активные фармацевтические субстанции, нефтепродукты и другие устойчивые органические соединения.

БЛАГОДАРНОСТЬ И ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена без внешнего финансирования.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА REFERENCES

1. **Фомченкова Л.Н.** Отечественный рынок текстильных красителей в условиях санкций. *Vest. Хим. Пром.* 2023. URL: <http://vestkhimprom.ru/posts/otechestvennyj-rynok-tekstilnykh-krasitelej-v-usloviyakh-sanktsij> **Fomchenkova L.N.** Domestic market of textile dyes under sanctions. *Vestn. Khim. Prom.* 2023. (in Russian). URL: <http://vestkhimprom.ru/posts/otechestvennyj-rynok-tekstilnykh-krasitelej-v-usloviyakh-sanktsij>
2. **Adesanmi B.M., Hung Y.T., Paul H., Huhnke C.** Comparison of dye wastewater treatment methods: A review. *GSCARR.* 2022. V. 10. N 2. P. 126. DOI: 10.5281/zenodo.6331586.
3. **Forgacs E., Cserháti T., Oros G.** Removal of synthetic dyes from wastewaters: a review. *Environ. int.* 2004. V. 30. N 7. P. 953-971. DOI: 10.1016/j.envint.2004.02.001.
4. **Singha K., Pandit P., Maity S., Sharma S.R.** Harmful environmental effects for textile chemical dyeing practice. *Gr. Chem. Sust. Textil.* 2021. P. 153-164. DOI: 10.1016/B978-0-323-85204-3.00005-1.
5. **Ali I., Kon'kova T., Belkina I., Galunin E., Rysev A., Morozov A., Almalki A.S.A., Obaid R. J., Alsharif M.A.** Facile synthesis and characterization of advanced cobalt materials for degradative and adsorptive removal of carmoisine in water. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 2021. V. 18. P. 3221–3236. DOI: 10.1007/s13762-021-03529-2.
6. **Shindhal T., Rakholiya P., Varjani S., Pandey A., Ngo H.H., Guo W., Ng H.Y., Taberzadeh M.J.** A critical review on advances in the practices and perspectives for the treatment of dye industry wastewater. *Bioengineered.* 2021. V. 12. N 1. P. 70-87. DOI: 10.1080/21655979.2020.1863034.
7. **Кузин Е.Н., Кручинина Н.Е.** Получение комплексных титансодержащих коагулянтов методом химической дегидратации. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2022. Т. 65. Вып. 5. С. 103-111. DOI: 10.6060/ivkkt.20226505.6578. **Kuzin E.N., Kruchinina N.E.** Obtaining complex titanium-containing coagulants by the method of chemical dehydration. *ChemChemTech [Izv. Vyssh.Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2022. V. 65. N 5. P. 103-111 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20226505.6578.
8. **Tang K.H.D., Darwish N.M., Alkahtani A.M., Abdel-Gawwad M.R., Karácsony P.** Biological removal of dyes from wastewater: a review of its efficiency and advances. *Trop. Aqua. Soil Pollut.* 2022. V. 2. N 1. P. 59-75. DOI: 10.53623/tasp.v2i1.72.
9. **Rafaqat S., Ali N., Torres C., Rittmann B.** Recent progress in treatment of dyes wastewater using microbial-electro-Fenton technology. *RSC Adv.* 2022. V. 12. N 27. P. 17104-17137. DOI: 10.1039/D2RA01831D.
10. **Kuzin E.N., Kruchinina N.E.** Titanium-containing coagulants for foundry wastewater treatment. *CIS Iron Steel Rev.* 2020. V. 20. N 2. P. 66. DOI: 10.17580/cisirs.2020.02.14.
11. **Kuzin E., Averina Y., Kurbatov A., Kruchinina N., Boldyrev V.** Titanium-containing coagulants in wastewater treatment processes in the alcohol industry. *Processes.* 2022. V. 10. N 3. P. 440. DOI: 10.3390/pr10030440.
12. **Matveevich V.A., Duka G.G., Gontsa M.V., Yambartsev V.F., Moku L.V.** Removal of direct dyes from textile wastewater by means of combined methods. *Surf. Eng. App. Electrochem.* 2009. V. 4. N 258. P. 69-75. DOI: 10.3103/S1068375509040115.
13. **da Silva Santos D.H., Xiao Y., Chaukura N., Hill J.M., Selvasembian R., Zanta C.L.S., Meili L.** Regeneration of dye-saturated activated carbon through advanced oxidative processes: A review. *Heliyon.* 2022. V. 8. N 8. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e10205.
14. **Crini G., Lichtfouse E.** Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment. *Environ. Chem. Lett.* 2019. V. 17. P. 145-155. DOI: 10.1007/s10311-018-0785-9.
15. **Kuznetsov V.V., Ivantsova V.A., Kuzin E.N., Pirogov A.V., Mezhuev Y. O., Filatova E.A., Averina Y.M.** Study of the Process of Electrochemical Oxidation of Active Pharmaceutical Substances on the Example of Nitrofurazone ((2 E)-2-[(5-Nitro-2-furyl) methylene] hydrazine Carboxamide). *Water.* 2023. V. 15. N 19. P. 3370. DOI: 10.3390/w15193370.

16. **Sarantseva A.A., Ivantsova N.A., Kuzin E.N.** Investigation of the Process of Oxidative Degradation of Phenol by Sodium Ferrate Solutions. *Russ. J. Gen. Chem.* 2023. V. 93. N 13. P. 3454-3459. DOI: 10.1134/S1070363223130273.
17. **Shah P.D., Dave S.R., Rao M.S.** Enzymatic degradation of textile dye Reactive Orange 13 by newly isolated bacterial strain *Alcaligenes faecalis* PMS-1. *Int. Biodet. Biodeg.* 2012. V. 69. P. 41-50. DOI: 10.1016/j.ibiod.2012.01.002.
18. **Кулебякина А.И., Дубровина В.Н., Киреев С.Г., Иванцова Н.А., Шашковский С.Г.** Об оценке эффективности процесса высокоинтенсивного окисления. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2022. Т. 65. Вып. 11. С. 104-110. DOI: 10.6060/ivkkt.20226511.6655. **Kulebiakina A.I., Dubrovina V.N., Kireev S.G., Ivantsova N.A., Shashkovskiy S.G.** On evaluation of the efficiency of the process of advanced oxidation. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]* 2022. V. 65. N 11. P. 104-110 (in Russian) DOI: 10.6060/ivkkt.20226511.6655.
19. **Scaria J., Nidheesh P.V.** Comparison of hydroxyl-radical-based advanced oxidation processes with sulfate radical-based advanced oxidation processes. *Curr. Opin. Chem. Eng.* 2022. V. 36. P. 100830. DOI: 10.1016/j.coche.2022.100830.
20. **Behnami A., Croué J.P., Aghayani E., Pourakbar A.** A catalytic ozonation process using MgO/persulfate for degradation of cyanide in industrial wastewater: mechanistic interpretation, kinetics and by-products. *RSC Adv.* 2021. V. 11. N 58. P. 36965-36977. DOI: 10.1039/D1RA07789A.
21. **Behnami A., Aghayani E., Benis K.Z., Sattari M., Pourakbar M.** Comparing the efficacy of various methods for sulfate radical generation for antibiotics degradation in synthetic wastewater: degradation mechanism, kinetics study, and toxicity assessment. *RSC Adv.* 2022. V. 12. N 23. P. 14945-14956. DOI: 10.1039/D2RA01618D
22. **Serrano K., Michaud P.A., Comminellis C., Savall A.** Electrochemical preparation of peroxodisulfuric acid using boron doped diamond thin film electrodes. *Electrochim. Act.* 2002. V. 48. N 4. P. 431-436. DOI: 10.1016/S0013-4686(02)00688-6.
23. **Ropp R.C.** Encyclopedia of the alkaline earth compounds. Oxford: Elsevier Inc. 2013. 1187 p. DOI: 10.1016/C2012-0-00777-6.
24. **Cooksey C., Dronsfield A.** Fuch sine or magenta: the second most famous aniline dye. A short memoir on the 150th anniversary of the first commercial production of this well known dye. *Biotech. Histochem.* 2009. V. 84. N 4. P. 179-183. DOI: 10.1080/10520290903081401.
25. **Wexler P., Anderson B.D.** Encyclopedia of toxicology. Oxford: Elsevier Inc. 2005. V. 1. 754 p. DOI: 10.1016/B0-12-369400-0/09003-7.
26. **Elijah O.C., Collins O.N., Obumneme O.C., Jessica N.B.** Application of modified agricultural waste in the adsorption of bromocresol green dye. *Asian J. Chem. Sci.* 2020. V. 7. N 1. P. 15-24. DOI: 10.9734/ajocs/2020/v7i119011.
27. **Onu C.E., Ohale P.E., Ekwueme B.N., Oboiora-Okafo I.A., Okey-Onyesolu C.F., Onu C.P., Ezema C.A., Onu O.O.** Modeling, optimization, and adsorptive studies of bromocresol green dye removal using acid functionalized corn cob. *Clean. Chem. Eng.* 2022. V. 4. P. 100067. DOI: 10.1016/j.clce.2022.100067.
28. **Oladoye P.O., Ajiboye T.O., Omotola E.O., Oyewola O.J.** Methylene blue dye: Toxicity and potential elimination technology from wastewater. *Res. Eng.* 2022. V. 16. P. 100678. DOI: 10.1016/j.rineng.2022.100678.
29. **Khan I., Saeed K., Zekker I., Zhang B., Hendi A.H., Ahmad A., Ahmad S., Zada N., Ahmad H., Shah L.A., Shah T., Khan I.** Review on methylene blue: Its properties, uses, toxicity and photodegradation. *Water.* 2022. V. 14. N 2. P. 242. DOI: 10.3390/w14020242.
30. **Muthuraman G., Teng T.T.** Extraction of methyl red from industrial wastewater using xylene as an extractant. *Prog. Nat. Sci.* 2009. V. 19. N 10. P. 1215-1220. DOI: 10.1016/j.pnsc.2009.04.002.
31. **Gessner T., Mayer U.** Triarylmethane and diarylmethane dyes. *Ullmann's Encycl. Ind. Chem.* 2000. V. 37. P. 425-478. DOI: 10.1002/14356007.a27_179.
32. **Xia X., Zhu F., Li J., Yang H., Wei L., Li Q., Jiang J., Zhang G., Zhao Q.** A review study on sulfate-radical-based advanced oxidation processes for domestic/industrial wastewater treatment: degradation, efficiency, and mechanism. *Front. Chem.* 2020. V. 8. P. 592056. DOI: 10.3389/fchem.2020.592056.
33. **Xu M., Wu C., Zhou Y.** Advancements in the Fenton process for wastewater treatment. *Adv. Oxid. Process.* 2020. V. 61. P. 61-77. DOI: 10.5772/intechopen.90256.

Поступила в редакцию 02.07.2024

Принята к опубликованию 10.10.2024

Received 02.07.2024

Accepted 10.10.2024