

НАУЧНЫЙ ОБЗОР

УДК 66.094.3-92

**НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ОТ КРАСИТЕЛЕЙ
НА ОСНОВЕ ОКИСЛИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ**

Абдулгалим Будаевич Исаев¹, Асият Германовна Магомедова²

^{1,2} Дагестанский государственный университет, кафедра неорганической химии и химической экологии, Россия

Автор, ответственный за переписку: Абдулгалим Будаевич Исаев, abdul-77@yandex.ru

Аннотация. В настоящее время актуальна проблема минимизации антропогенного воздействия на окружающую среду и улучшения качества водных ресурсов. Представлен обзор исследований по современным окислительным процессам и их использованию для удаления органических красителей из сточных вод. Среди технологических приемов очистки сточных вод можно выделить процессы окисления, основанные на использовании реактива Фентона: окисление органических красителей пероксидом водорода в присутствии ионов железа(II) при облучении УФ-светом (фото-Фентон), воздействии ультразвуком в присутствии ионов железа(II) и пероксида водорода (соно-Фентон), при фотоэлектрохимическом генерировании пероксида водорода в присутствии ионов железа(II) и облучении УФ-светом (фотоэлектро-Фентон), а также в присутствии нерастворимых железосодержащих соединений и пероксида водорода (гетерогенный процесс Фентона). Эти окислительные процессы используют для разложения органических загрязнителей, обладающих высокой химической стабильностью, из-за неэффективности обычных методов очистки трудноразлагаемых органических соединений.

Ключевые слова: современные окислительные процессы, красители, сточные воды, очистка

Благодарности. Авторы благодарны Российскому фонду фундаментальных исследований за предоставление Дагестанскому государственному университету лицензионного доступа к коллекции журналов и базам данных издательств Springer Nature, Elsevier, ASC Publications, IOP Publishing и Wiley, использованных при подготовке данного обзора.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-33-90220\20).

Для цитирования: Исаев А.Б., Магомедова А.Г. Новые технологии очистки сточных вод от красителей на основе окислительных процессов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия. Т. 63. № 4. С. 247–268.

SCIENTIFIC REVIEW

**ADVANCED OXIDATION PROCESSES BASED EMERGING
TECHNOLOGIES FOR DYE WASTEWATER TREATMENT**

Abdulgalim B. Isaev¹, Asiyat G. Magomedova²

^{1,2} Dagestan State University, Department of Inorganic Chemistry and Chemical Ecology

Corresponding author: Abdulgalim B. Isaev, abdul-77@yandex.ru

Abstract. Currently, the issue of minimizing the environmental impact of anthropogenic activities and improving the quality of water resources is topical. The paper presents an overview of research on advanced oxidation processes and their use for the removal of organic dyes from wastewater. Among wastewater treatment technologies based on advanced oxidation processes can be divided: oxidation of organic dyes with hydrogen peroxide in the presence of iron (II) ions when irradiated UV light (photo-Fenton), exposure of wastewater to ultrasound in the presence of iron (II) ions and hydrogen peroxide (sono-Fenton), the photoelectrochemical generation of hydrogen peroxide in the presence of iron (II) ions and UV light irradiation (photoelectro-Fenton), as well as in the presence of heterogeneous iron-containing compounds and hydrogen peroxide (Fenton-like process). These advanced oxidation processes are used for the removal of organic dyes which are highly chemically stable because the other treatment methods, such as biological oxidation is inefficient.

Keywords: advanced oxidation processes, dyes, wastewater, treatment

Acknowledgements. The authors are grateful to the Russian Foundation for Basic Research for providing Dagestan State University with licensed access to the collection of journals and databases published by Springer Nature, Elsevier, ASC Publications, IOP Publishing and Wiley, used in the preparation of this review.

Financial Support. The study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research (project No. 20-33-90220\20).

For citation: Isaev A.B., Magomedova A.G. Advanced oxidation processes based emerging technologies for dye wastewater treatment // Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 2. Chemistry. T. 63. N 4. P. 247–268.

Вода – дефицитный природный ресурс, фундаментальная основа устойчивого развития общества. Демографический рост и промышленное развитие требуют все большего объема питьевых и промышленных вод. Использование большого количества водных ресурсов приводит к образованию сточных вод, которые необходимо очищать перед их возвращением в окружающую среду [1].

Одним из видов промышленной деятельности, где образуется большое количество сточных вод, является текстильная промышленность. При производстве текстиля используется множество различных процессов, в результате которых образуются сточные воды, сильно различающиеся по составу [2]. Огромное потребление воды, которая превращается в сильно загрязненные сточные воды, представляет главную проблему текстильной промышленности [3]. Большая часть потребляемой воды, а следовательно, и большее образование сточных вод приходится на влажные процессы, используемые в красильном производстве. В настоящее время наиболее рациональное решение этой проблемы заключается в использовании закрытого водопроводного цикла внутри производства [4], что целесообразно как с эко-

номической, так и с экологической точек зрения [5].

Среди основных компонентов сточных вод текстильной промышленности можно выделить органические красители [3]. Сточные воды текстильных фабрик содержат смесь красителей, ионов металлов и другие загрязнители. Синтетические красители можно легко получать, они обладают широкой гаммой цветов и характеризуются стойкостью, что позволяет использовать их более широко, чем природные красители. Стоки, содержащие красители, имеют высокую цветность, высокое значение pH, содержат взвешенные твердые частицы, большое количество химически потребляемого кислорода (ХПК) и биохимически потребляемого кислорода (БПК), содержат ионы металлов, имеют высокую температуру [3].

В настоящее время к текстильному производству предъявляются жесткие нормативные требования, однако экономически привлекательные способы для удаления цветности отсутствуют. Существующие технологии, такие как мембранная фильтрация или адсорбция активированным углем, требуют больших инвестиций и коммерчески невыгодны.

Из-за сложности и изменчивости сточных вод при производстве текстиля необходимо внедрять

высокотехнологичные системы очистки воды. На практике используют методы, включающие разделение сточных вод на потоки, мембранные процессы, биологические процессы, коагуляцию/флокуляцию и процессы окисления (ПО) в различных конфигурациях, позволяющие повторно использовать текстильные сточные воды [4]. Мембранные процессы и коагуляция/флокуляция переносят загрязнители из одной фазы в другую или концентрируют их в одной фазе, в то время как биологические процессы и ПО могут разлагать или полностью удалять загрязнители. ПО включают в себя множество различных методов, которые имеют одну общую черту – приводят к образованию активных форм кислорода, в частности гидроксильных радикалов, обычно при комнатной температуре и атмосферном давлении [5].

Современные окислительные процессы

Использование ПО считается высококонкурентным технологическим способом очистки воды от тех органических загрязнителей, которые не поддаются удалению традиционными методами из-за их высокой химической стабильности и/или низкой способности к биологическому разложению [6]. ПО перспективны для полного восстановления качественных показателей воды, загрязненной токсичными, стойкими органическими соединениями, а также микроорганизмами. Принцип действия ПО заключается в образовании активных форм кислорода, таких как гидроксильные радикалы, перекись водорода (H_2O_2), супероксид-ионы (O_2^-), для окисления органических загрязнителей до CO_2 , H_2O и других минеральных соединений.

Гидроксильный радикал – сильный неселективный химический окислитель, который быстро реагирует с широким спектром органических загрязнителей. Относительная окислительная способность различных окисляющих веществ представлена в табл. 1. Образование гидроксильных радикалов достигается при использовании либо чистых окислителей, либо комбинированных процессов окисления (например, совместное воздействие пероксида водорода, озона и УФ-излучения или пероксида водорода и ионов двухвалентного железа (реактив Фентона), электрохимического окисления, сонолиза, сверхкритического состояния воды и т.д.) [7].

Существующие процессы окисления представлены на рис. 1. Они могут быть подразделены на ПО с использованием озона, фотокатализа, электрохимические, на основе реактива Фентона ($H_2O_2 + Fe^{2+}$), сонокатализа и иные процессы окисления. Следует отметить, что эту классификацию не следует рассматривать как строгую, поскольку процессы могут включать разные технологии.

Перед существующими традиционными методами очистки ПО имеют преимущества, такие как эффективность при низкой концентрации загрязняющих веществ и отсутствие образования химического или биологического осадка [8].

Процессы, представленные на рис. 1, в разной степени реализованы: от уже хорошо зарекомендовавших себя ПО до процессов, находящихся на стадии лабораторных исследований. ПО включают в себя две основные стадии: образование активных окислительных частиц *in situ* и реакцию окислителей с целевыми загрязнителями. Механизм образования активных

Таблица 1

Окислительный потенциал окислителей

Окислитель	Потенциал, В
Фтор	3,06
Гидроксильный радикал	2,80
Атомарный кислород	2,42
Озон	2,08
Пероксид водорода	1,78
Гипохлорит	1,49
Газообразный хлор	1,36
Диоксид хлора	1,27
Молекулярный кислород	1,23

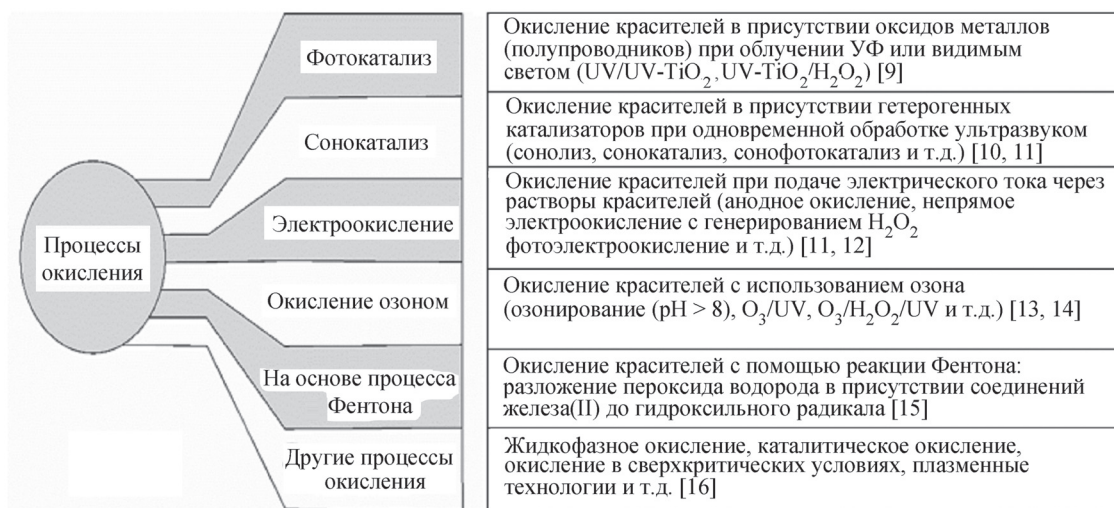


Рис. 1. Классификация процессов окисления, используемых при очистке воды

окислительных частиц зависит от конкретных параметров процесса и многих других факторов, включающих и конструкцию используемой системы, и ее состав [17]. При этом все они используют активный окислитель – гидроксильные радикалы (HO[•]) с окислительно-восстановительным потенциалом 2,80 эВ [18].

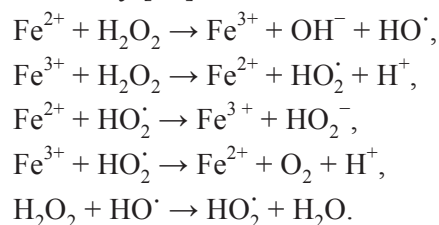
Усовершенствованные процессы окисления (УОП), включающие различные методы реализации ПО, в последние десятилетия вызывают повышенный интерес у исследователей для удаления из сточных вод как органических красителей, так и других органических загрязнителей [19]. На рис. 2, а приведены результаты поиска информации в базе данных Web of Science по ключевым словам (advanced, oxidation, processes, dye), из которых видно, что интерес исследователей к процессам окисления растет по экспоненте. Наибольший интерес вызывают процессы окисления, основанные на генерировании гидроксильных радикалов в присутствии пероксида водорода и ионов железа(II) (реактив Фентона) (рис. 2, б).

На основе общей оценки литературных данных можно сделать вывод о том, что необходимо провести дополнительные исследования по кинетике разложения прекурсоров активных форм кислорода, их взаимодействию с первичными загрязнителями, моделированию реакторов, различным комбинированным процессам окисления, а также по кинетике первоначального воздействия ПО на первичные загрязнители и образование промежуточных частиц. Кроме того, важно разработать более совершенные экономические модели для оценки стоимости комбинированных процессов, зависящих от конкретных характеристик про-

мышленных сточных вод, общей эффективности дезактивации и относительной стоимости УОП по сравнению, например, с биологической очисткой [20].

Окисление с использованием реактива Фентона

Химия реактива Фентона включает реакции пероксида водорода в присутствии ионов железа(II) с образованием активных в процессах окисления частиц, таких как гидроксильный радикал. Реакция Фентона является экологически чистым процессом [21]. Гидроксильные радикалы HO[•] образуются во время активации пероксида водорода H₂O₂ ионами Fe²⁺ с образованием иона Fe³⁺ (рис. 3). Окисленный ион Fe³⁺ вступает в реакцию с H₂O₂ и образует ион Fe²⁺. Образование радикалов HO[•] и превращение Fe²⁺ в ионы Fe³⁺ происходит по следующему механизму [22]:



Механизмы реакции Фентона и других подобных процессов достаточно сложны, на них влияют многие факторы. В литературе подробно описаны процессы, протекающие с использованием системы Фентона, включая реакцию Фентона с фотоусилителем, использование хелатного железа, электрореакции Фентона и реакции Фентона с использованием гетерогенных катализаторов [15, 23]. Процессы окисления с использованием

активации H_2O_2 солями железа, называемые реактивом Фентона, эффективны при устранении многих опасных органических загрязнителей в воде [24].

Реактив Фентона эффективен при очистке текстильных сточных вод, содержащих различные красители. Однако использование в большом количестве пероксида водорода и катализатора сделало этот процесс экономически невыгодным. По

этой причине рассматривается возможность генерирования пероксида водорода на месте потребления, что делает очистку текстильных сточных вод с помощью реактива Фентона практически осуществимой [25].

В литературе имеется большое число публикаций, посвященных окислению органических соединений с использованием реактива Фентона. Большое внимание исследователей привлекают

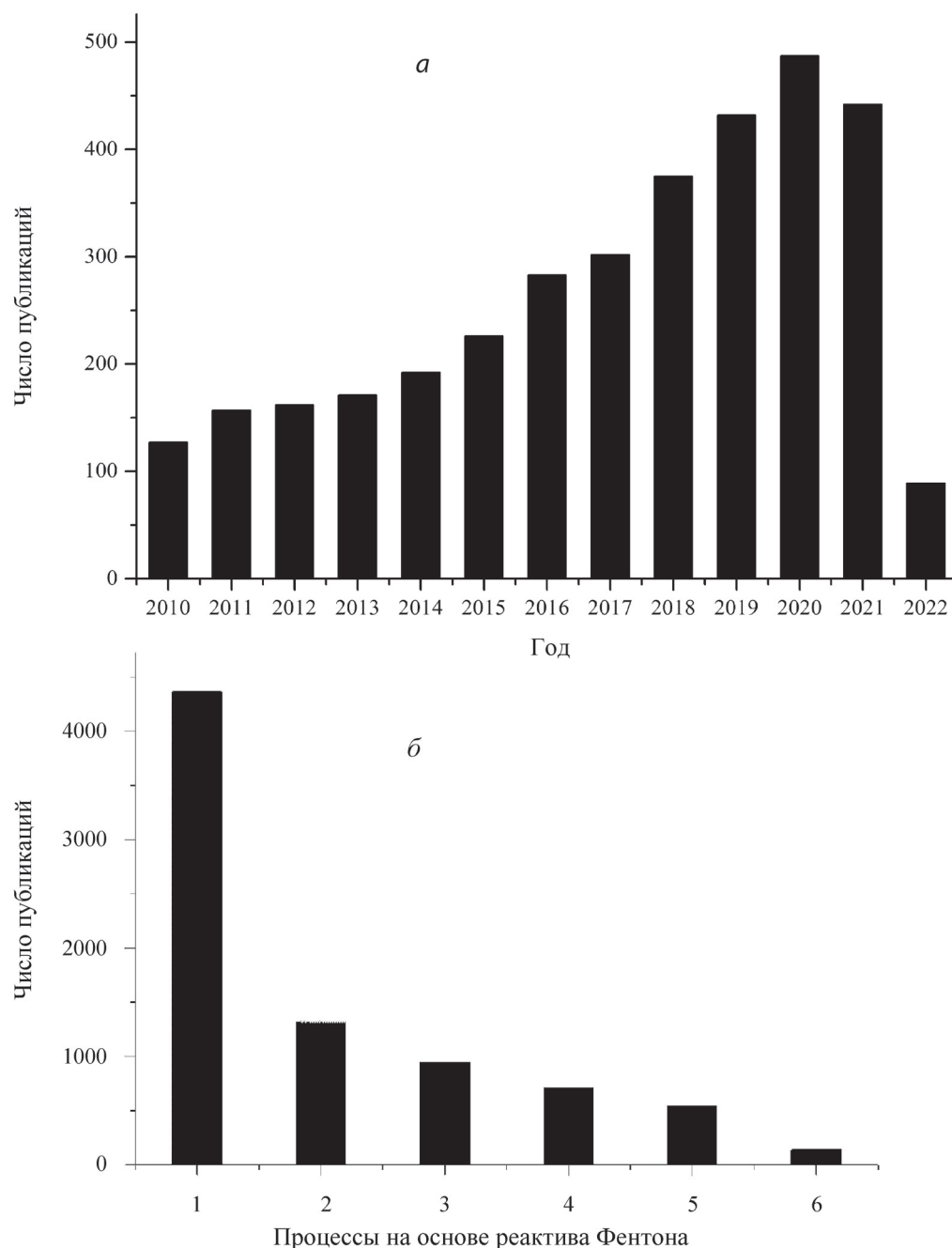


Рис. 2. Результаты поиска информации в Web of Science по ключевым словам: *a* – advanced, oxidation, processes, dye; *б* – характеризующим процессы на основе реактива Фентона (1 – Fenton, 2 – Photo-Fenton, 3 – Fenton-like, 4 – Electro-Fenton, 5 – Photoelectro-Fenton, 6 – Sono-Fenton)

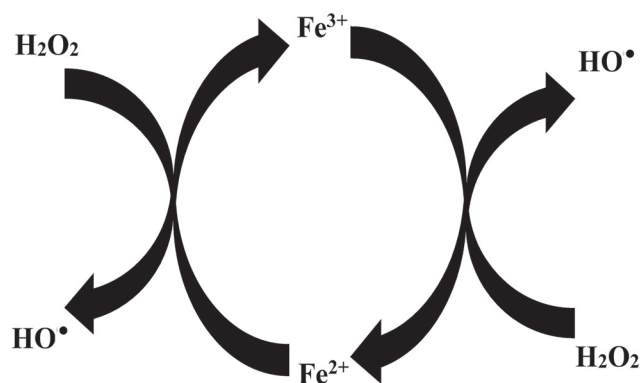


Рис. 3. Механизм образования гидроксильного радикала в реакции Фентона

органические красители, удаление которых из водного раствора осуществляют с использованием реактива Фентона и модифицированных процессов Фентона [26].

Сочетание окисления красителей с помощью процесса Фентона с другими физико-химическими методами делают его более эффективным [27]. Так, в [28] представлены данные по окислению красителя метиленового синего с использованием наночастиц магнетита и гетита в гетерогенной реакции Фентона и ионов двухвалентного железа в гомогенной. Результаты исследований показали, что эта гомогенная система наиболее эффективна для окисления красителя как в кислых, так и в нейтральных средах. Однако скорость окисления уменьшается при значении pH 9,0 из-за снижения содержания доступных ионов Fe²⁺ в растворе и образования осадка гидроксида железа. Система Fe₃O₄/H₂O₂ продемонстрировала лучшую эффективность удаления красителя, чем система FeO(OH)/H₂O₂, что можно объяснить наличием катионов Fe(II) в структуре магнетита и большей площадью поверхности последнего.

Обесцвечивание основного бирюзового синего X-GB и основного синего X-GRRL с использованием окисления реактивом Фентона, проведенное в работе [29] показало, что при оптимальных условиях (pH 3,0; [H₂O₂] = 4,8 мМ; T = 50 °C, t = 80 мин для X-GB и pH 5,0; [H₂O₂] = 5,6 мМ, T = 40 °C, t = 60 мин для X-GRRL) степень обесцвечивания составила 85,83 и 74,98% для X-GB и X-GRRL соответственно. В [30] было исследовано окисление двух кислотных красителей – кислотного фиолетового 49 (КФ 49) и кислотного красного 88 (КК 88) в водных растворах с использованием процесса Фентона. Было обна-

ружено, что максимальная эффективность удаления красителя КФ 49 (98,35%) была достигнута при pH 3 и значениях концентрации H₂O₂ и Fe²⁺, равных 0,005 и 0,0005 моль соответственно для раствора красителя с концентрацией c = 100 мг/л. Для красителя КФ 49 (c = 200 мг/л) максимальная эффективность удаления красителя, равная 97,25%, была получена при pH 3 и значениях концентрации H₂O₂ и Fe²⁺, равных 0,01 и 0,001 моль соответственно.

При исследовании окисления прямого голубого 71 (ПГ71) с использованием реактива Фентона [31] для обесцвечивания и удаления ХПК были установлены следующие оптимальные условия: pH 3,0; c(Fe²⁺) = 3 мг/л, c(H₂O₂) = 125 мг/л. При оптимальных условиях эффективность удаления цветности красителя составляла 94%, а значение ХПК, равное 50,7%, было достигнуто через 20 мин после начала реакции при концентрации красителя в растворе 100 мг/л.

В работах [32–35] исследовано окисление активного черного [33–35], активного голубого 13 [32] и кислотного оранжевого 7 [32]. В этом случае обесцвечивание красителей происходит за счет разрыва связи –N=N– в их структуре.

Дана оценка влияния фенольных медиаторов (пяти дигидроксибензолов и галловой кислоты) на кинетику обесцвечивания фенолового красного, хромотропа 2R и метиленового синего при использовании реактива Фентона [35]. В табл. 2 приведены сравнительные характеристики процессов удаления красителей при использовании реактива Фентона.

Сравнительное исследование эффективности окисления реактивом Фентона разных красителей в реальных [48–51] и модельных [52] сточных

водах для удаления цветности, ХПК и мутности реальных сточных вод текстильной промышленности с использованием различных вариантов реализации процесса Фентона показало, что максимальная эффективность удаления цвета (>92%) была зафиксирована в процессе Фентона при pH 3 для всех образцов красителей (табл. 2).

Сочетание биологической очистки с процессом Фентона также приводит к более эффективной очистке сточных вод [31] (88–98% для ХПК, 83–95% для БПК 5 и 91–98% для обесцвечивания). Комплексная обработка позволяет очищенным сточным водам соответствовать пределам сброса с сокращением эксплуатационных расходов в диапазоне 24–39% по сравнению с окислением реактивом Фентона [53]. Удаление органических соединений и цвета из вод, имитирующих сточные воды при крашении хлопка, оценивали для комбинированного процесса окисления реагентом Фентона и биологического разложения в реакторе периодического действия [54]. При очистке сточных вод процесс Фентона обладает рядом важных преимуществ [55]:

- простота и гибкость, позволяющие легко реализовать метод на существующих предприятиях;
- простые в обращении и относительно недорогие химикаты;
- отсутствие потребления дополнительной энергии.

К сожалению, метод имеет ряд недостатков:

- довольно высокая стоимость и риски, связанные с хранением и транспортировкой H_2O_2 ;
- необходимость в значительном количестве химических соединений для подкисления сточных вод при pH 2–4 перед дезактивацией и/или для нейтрализации обработанных растворов перед удалением;
- накопление железного шлама, который необходимо удалять в конце обработки.

Окисление красителей с использованием системы фото-Фентон ($H_2O_2 + Fe^{2+} + УФ\text{-}свет$)

Использование реактива Фентона при одновременном облучении ультрафиолетовым и/или солнечным светом известно в литературе как система фото-Фентон [23, 56]. Наличие УФ-

Таблица 2

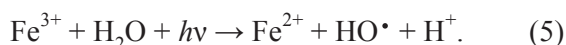
Эффективность удаления различных красителей с использованием реактива Фентона (α – степень обесцвечивания)

Наименование красителя	Параметры процесса			α , %	Ссылка
	$[H_2O_2]$	$c_{нач. \text{красителя}}$	pH		
Активный черный 5	$7,3 \times 10^{-4}$ М	$1,0 \times 10^{-4}$ М	3,0	97,5	[34]
Прямой голубой 15	$2,8 \times 10^{-3}$ М	$4,7 \times 10^{-5}$ М	4,0	100	[36]
Кислотный черный 1	$5,4 \times 10^{-4}$ М	$7,0 \times 10^{-5}$ М	6,3	95	[37]
Процион темно-красный Н-Е×L	$8,8 \times 10^{-3}$ М	100 мг/л	3,5	99	[38]
Оранжевый II	14×10^{-3} М	$0,3 \times 10^{-3}$ М	3,0	99,7	[39]
Судан черный Б	100 мг/л	50 мг/л	3,0	98	[40]
Метиленовый голубой	4 мл 30%	40 мг/л	3–13	89	[41]
Дисперсный красный 343	$0,5 \times 10^{-3}$ М	100 мг/л	3,5	100	[42]
Малахитовый зеленый	$25,6 \times 10^{-3}$ М	10 мг/л	3,0	93,8	[43, 44]
Амидо черный 10B	$0,5 \times 10^{-3}$ М	50 мг/л	3,5	99,25	[45]
Бирюзово-синий FBL	33,3 мг/мл	500 мг/л	2,5	99,3	[46]
Изолан оранжевый S-RL	33,3 мг/мл	500 мг/л	2,7	98,26	[46]
Индантреновый красный FBV	33,3 мг/мл	500 мг/л	2,45	99,06	[46]
Кристаллический фиолетовый	$0,5 \times 10^{-3}$ М	$0,15 \times 10^{-3}$ М	5,0	100	[47]

облучения в сочетании с реактивом Фентона приводит к повышению эффективности процесса окисления органических красителей за счет дополнительного образования гидроксильных радикалов при фотолизе H_2O_2 [57–59]:

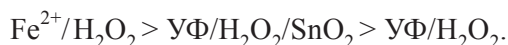


Под действием УФ-облучения происходит восстановление Fe^{3+} до Fe^{2+} , что приводит к регенерации реактива Фентона и повышению эффективности процесса окисления красителей за счет участия в реакции образования гидроксильных радикалов фотогенерированного Fe^{2+} [60–62]:



Использование системы фото-Фентон позволяет с высокой эффективностью удалять из сточных вод различные классы красителей (кислотные [63–65], основные [66–68], активные [57, 69], дисперсные [70], прямые [71] и т.д.). Кроме того, возможность использования солнечной энергии в процессах фото-Фентона способствует повышению их экономической эффективности.

Фотоокисление дисперсного красителя фиолетового 63 исследовано в водном растворе при разном сочетании реагентов: УФ/ H_2O_2 , УФ/ H_2O_2 / SnO_2 и реактив Фентона. Через 60 мин после начала реакции максимальное обесцвечивание красителя для УФ/ H_2O_2 , УФ/ H_2O_2 / SnO_2 и Fe^{2+} / H_2O_2 составило 81,0; 92,7 и 96,4% соответственно, причем сравнительный порядок каталитического разложения был следующим [72]:



Процесс фото-Фентона с использованием УФ-излучения оказался наиболее эффективным [73] при окислении активного серого красителя BF-2R (смесь красителей активного желтого 145, активного оранжевого 122 и активного черного 5) при искусственном солнечном свете. Использование системы $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{Fe}^{2+} + \text{УФ-свет}$ приводит к более эффективному разложению красителей. Однако для растворов, обработанных с использованием реактива Фентона, наблюдается остаточная токсичность [74].

Кинетику окисления индигокармина для системы фото-Фентон сравнили с процессами Фентона, H_2O_2 /УФ-свет и прямого воздействия УФ-света. Наиболее эффективное удаление общего «органического» углерода (75% за 60 мин) было получено для системы Фентона при соотношении H_2O_2 и Fe^{2+} , равном 6:1. В процессе фото-Фентона избыток H_2O_2 снижает скорость реакции [75].

Окисление активного синего BF-5G и красного ремазола RB оценивали для процессов Фентона и фото-Фентона. Показано, что процессы Фентона и фото-Фентона для окисления двух красителей с использованием в качестве источника облучения УФ-лампы (300 Вт) дают идентичные результаты, достигая степени окисления более 98% для каждого из красителей [76]. В результате окисления красителей активного красного 195 и прямого черного 22 с использованием системы фото-Фентон при облучении солнечным светом вместо УФ-света степень превращения достигает 99% через 150 мин обработки. Сравнение процессов окисления азокрасителя кислотного красного 1 в водном растворе реактивом Фентона, перхлоратом железа, H_2O_2 и методом фото-Фентона показало, что наиболее полное обесцвечивание раствора красителя происходит при использовании H_2O_2 / Fe^{2+} /УФ-свет [77].

Процесс фото-Фентона с использованием УФ-излучения протекает в гомогенной среде, однако его применение имеет и недостатки, связанные с необходимостью работы в узком диапазоне pH (2,8–3,5) и образованием осадка из оксигидроксидов железа.

В настоящее время изучается вопрос о применении процесса фото-Фентона для окисления органических красителей при нейтральных или близких к ним значениям pH [78, 79]. Обнаружено, что добавление к водным растворам красителей разных органических веществ, в частности гуминовой кислоты, позволяет осуществлять процесс фото-Фентон с высокой эффективностью при нейтральных значениях pH [80]. Другим подходом является использование гетерогенных железосодержащих материалов в качестве катализаторов разложения пероксида водорода при облучении УФ или солнечным светом [81–83]. В качестве катализаторов разложения пероксида водорода предложено использовать различные соединения железа и железосодержащие материалы, в частности Fe_2O_3 [65, 84–88], Fe_3O_4 [89], нуль-валентное железо [90–92], железосодержащие цеолиты [93, 94], ферриты [95, 96] и т.д. В табл. 3 приведены сравнительные данные по окислению различных красителей с использованием системы фото-Фентон в гомогенных и гетерогенных условиях.

Одним из недостатков окисления органических красителей с использованием гомогенных процессов Фентона и фото-Фентона является образование осадка соединений железа. В настоящее время основное внимание уделяется проведению исследований системы фото-Фентон с использо-

Таблица 3

Эффективность окисления красителей с использованием систем фото-Фентон (α – степень обесцвечивания)

Краситель	Вид процесса*	[H ₂ O ₂]	C _{кр.} , мг/л	Катализатор	pH	Источник облучения	α , %	Ссылка
Амарант	1	15 мМ	25	FeWO ₄	2,5	флуоресцентная лампа	97	[97]
Индигокармин	2	24 мМ	50	–	3,0	УФ-свет	100	[98]
Основной голубой 41	2	3–6 мМ	0,2 мМ	–	3,0	УФ-свет	100	[99]
Оранжевый G	1	25 мг/л	50	Fe ₂ O ₃	–	УФ-свет	92	[65]
Прочин краснй Н-Е7В	2	250 мг/л	250	–	–	солнечный свет	86	[100]
Оранжевый П	2	0,29 мл/мин	20 ppm	–	3,1	солнечный свет	49	[101]
Родамин Б	1	0,5 мл 30%	15	Fe ₂ O ₃ /каолин	2,2–10,1	солнечный свет	98	[94]
Мордант желтый 10	1	200 мМ	100	Fe ⁰	3,0	LED	100	[91]
Родамин Б	1	0,5 мл 30%	10	g-C ₃ N ₄ /LaFeO ₃	–	ксеноновая лампа	97	[96]
Метиленовый голубой	1	-	20	Fe/Al ₂ O ₃	–	УФ-свет	99	[92]
Оранжевый П	2	200 мг/л	60	–	3,0	УФ-свет	100	[102]
Кислотный желтый 36	2	8,0 мМ	50	–	2,0	УФ-свет	100	[103]

Окончание табл. 3

Краситель	Вид процесса*	[H ₂ O ₂]	c _{кр.} , мг/л	Катализатор	pH	Источник облучения	α, %	Ссылка
Кислотный красный 114	1	150 мг/л	100	TiO ₂	2,5	УФ-свет	80	[104]
Метилловый оранжевый	1	300 мг/л	80	ярозит	4,5	УФ-свет	100	[105]
Дисперсный красный 1	2	23 мг/л	20	–	2,5	флуоресцентная лампа	100	[70]
Активный желтый 84	2	100 мг/л	5 мМ	–	3,0	УФ-свет	99	[106]
Цибакрон красный	2	250 мг/л	500 мг/л	–	3,0	флуоресцентная лампа	80–90	[107]
Метиленовый голубой	1	20 мг/л	20 мМ/л	Fe-хитозан/ монтмориллонит	3,0	видимый свет	100	[67]
Кислотный оранжевый 7	2	20 мг/л	40 мМ	–	3,0	УФ-свет	100	[108]
Кислотный голубой 161	2	0,1 мМ	18 мМ	–	3,5	УФ-свет	100	[109]
Кислотный оранжевый 24	2	200 мг/л	0,143 мМ	–	5,5	солнечный свет	95	[110]
Родамин Б	1	20 мг/л	10 мМ	γ-Fe ₂ O ₃ / бентонит	4,25	УФ-свет	97,8	[68]
Активный голубой 4	2	100 ppm	24 ppm	–	2	солнечный свет	100	[111]

* 1 – гетерогенный процесс, 2 – гомогенный процесс.

ванием в качестве катализатора разложения пероксида водорода различных железосодержащих соединений [66, 112–115]. Для осуществления процесса фото-Фентон при нейтральных значениях pH в качестве катализатора предложено использовать TiO_2 [112]. В этом случае гидроксильные радикалы являются основным окислителем в нейтральных и щелочных растворах, а в кислой среде окисление конкурирует с восстановлением молекул красителя.

Окисление красителей с использованием как реактива Фентона, так и системы фото-Фентон имеет недостатки, заключающиеся в том, что происходит быстрое уменьшение концентрации ионов Fe^{2+} из-за низкой скорости реакции восстановления Fe^{3+} до Fe^{2+} [116]. При этом происходит образование осадка, содержащего соединения железа, что требует проведения дополнительных процедур его утилизации [117].

Окисление красителей с использованием системы электро-Фентон ($\text{H}_2\text{O}_2 + \text{Fe}^{2+} + \text{электролиз}$)

В последние годы были разработаны новые процессы окисления, основанные на электрохимической технологии, для предотвращения и устранения загрязнения окружающей среды [118]. Использование системы электро-Фентон для удаления органических красителей имеет несколько вариантов реализации.

В первом случае в раствор, содержащий органические соединения, добавляются пероксид водорода и ионы Fe^{2+} с одновременным проведением электролиза при использовании инертных электродов с высокой каталитической активностью [119, 120].

Во втором случае в раствор либо добавляют пероксид водорода, а ионы Fe^{2+} образуются при растворении стальных/железных, чугуновых анодов, либо добавляют ионы Fe^{2+} с одновременным электрохимическим генерированием пероксида водорода [121, 122].

В третьем случае пероксид водорода образуется за счет электрохимического восстановления кислорода, генерирование ионов Fe^{2+} происходит за счет использования растворимого стального или железного анода [123, 124].

Использованию системы электро-Фентон для удаления красителей из модельных и реальных сточных вод посвящено большое число исследований [125–133]. Установлено, что присутствие ионов двухвалентного железа необходимо в процессах электро-Фентона и фотоэлектро-Фентона для разложения электрохимически генерируемо-

го пероксида водорода. Чтобы избежать использования солей железа в качестве прекурсоров для гомогенного процесса Фентона, железо иногда электрохимически осаждают на различных материалах с большой площадью поверхности, например на активированном угле (АУ) [134].

Исследована [135] эффективность удаления ХПК из реальных сточных вод процесса окрашивания с использованием Fe^{2+} в сочетании с электрогенерированной перекисью водорода на тканевом катоде из активированного углеродного волокна. Показано, что эффективность удаления ХПК существенно увеличивается (до $150 \text{ см}^3/\text{мин}$) с ростом скорости барботирования кислорода.

Путем электроосаждения Fe^{3+} были получены катоды из углеродного войлока, покрытые оксидами железа. Их использовали в процессе окисления красителя малахитового зеленого при pH 3,0 с помощью гетерогенного электро-Фентона и фотоэлектро-Фентона [136, 137] в реакторе с мешалкой. В качестве анода использовали допированный бором алмазный электрод (ДБА). Восстановление кислорода на электроде из углеродного войлока, покрытом оксидами железа, приводит к образованию пероксида водорода, разлагающегося с образованием гидроксильного радикала за счет протекания реакции Фентона.

Сравнительное окисление промышленных красителей голубого BR, фиолетового SBL и коричневого MF с исходной концентрацией 50 мг/л было изучено методами электрохимического окисления, а также с применением процессов электро-Фентона и фотоэлектро-Фентона на ДБА [138]. Было достигнуто полное обесцвечивание растворов красителей за счет окисления гидроксильными радикалами, которые образуются на аноде в результате окисления воды, и за счет протекания реакции Фентона с перексидом водорода, генерированным при катодном восстановлении кислорода. Смесь азокрасителей тартразина, понсо SS и прямого голубого 71 с концентрацией 105 мг/л в 0,05 М Na_2SO_4 при pH 3,0 обрабатывали, используя систему электро-Фентон с одновременным облучением солнечным светом. Сравнительные данные анодного окисления и окисления H_2O_2 , генерированном на катоде, показали низкую эффективность деструкции красителей. Установлено, что использование системы электро-Фентон приводит только к частичной минерализации красителей за счет образования низкомолекулярных органических соединений, более устойчивых к дальнейшему окислению [139]. Сочетание процесса электро-Фентон с УФ-

облучением ртутной лампой при окислении красителей приводит к увеличению степени обесцвечивания их растворов [140].

Окисление красителя кислотного голубого 5 электрохимическим методом с катодом, содержащим многостенные углеродные нанотрубки, в присутствии электролита сульфата натрия при рН 3,0 показало, что за равный промежуток времени (60 мин) с помощью процессов электро-Фентона и фотоэлектро-Фентона обесцвечивается соответственно 23,04 и 98,25% красителя [141]. Оптимальные параметры удаления некоторых красителей с использованием системы электро-Фентон приведены в табл. 4.

По сравнению с обычным реактивом Фентона, система электро-Фентон обладает рядом преимуществ:

отсутствие необходимости транспортировки пероксида водорода на место потребления,

удобство и легкость контроля за технологическими параметрами,

высокая эффективность.

Однако система электро-Фентон тоже имеет свои недостатки, которые заключаются в следующем:

небольшая скорость электрохимического генерирования H_2O_2 из-за низкой растворимости кислорода и низкого выхода по току при более высоких значениях рН;

высокие эксплуатационные расходы, ограничивающие применение указанного метода на практике.

Окисление красителей с использованием системы фотоэлектро-Фентон ($H_2O_2 + Fe^{2+} + \text{электролиз} + \text{УФ-свет}$)

Эффективность системы процессов электро-Фентон и фотоэлектро-Фентон основана на образовании *in situ* активных форм кислорода, таких как гидроксильный радикал (OH^\cdot). Органические вещества могут окисляться активными формами кислорода и «дырками», генерированными на поверхности полупроводниковых материалов [151–153].

Системе фотоэлектро-Фентон посвящено большое число исследований, которые отражены в обзоре, охватывающем период с 2010 до 2019 г. [154]. Высокая окислительная способность в методе Фентона с фотоусилением обусловлена сочетанием действия гидроксильных радикалов, генерируемых *in situ*, и действием УФ или солнечного излучения на сточные воды.

В [155] обсуждаются теоретические основы, экспериментальные установки и экологические приложения этого метода.

Изучен процесс минерализации красителя кислотного-желтого 42 (КЖ 42), широко используемого в текстильной промышленности. Разложение проводили в водном растворе, содержащем 100 мг/л красителя, с использованием процесса фотоэлектро-Фентон в электролизере, где анодом служил ДБА, а катодом – углеродный газодиффузионный катод [156]. Экспериментальные результаты демонстрируют хорошие характеристики этого процесса – полного удаления органических веществ удалось достичь после 240 мин обработки в оптимальных условиях при плотности тока $66,6 \text{ mA/cm}^2$ [157].

В [158] показана возможность окисления моноазокрасителя кислотного оранжевого 7, диазокрасителя кислотного красного 151 и триазокрасителя дисперсного синего 71 с использованием системы фотоэлектро-Фентон при облучении солнечным светом. Скорость процесса минерализации снижалась в ряду кислотный оранжевый 7 > дисперсный синий 71 > кислотный красный 151. Для первого соединения была достигнута степень минерализации 97%, а для двух других азокрасителей она составляет 90–92.

В [159] изучено окисление диазокрасителя DY4, связанное с деструкцией молекул красителя под действием гидроксильных радикалов, образующихся в результате реакции Фентона между H_2O_2 , генерируемой на катоде, и ионами Fe^{2+} , образующимися за счет фотолиза комплексов $Fe(III)$ под действием солнечного света. Установлено, что в ходе процесса достигается степень минерализации около 96–97%.

Использование процесса фотоэлектро-Фентон с ДБА оказалось наиболее эффективным методом окисления азокрасителя кислотного красного 1 при рН 3, дающим почти полную минерализацию благодаря дополнительному быстрому фотолизу таких промежуточных продуктов, как комплексы $Fe(III)$ – карбоксилат, под действием УФ-излучения [160].

Комбинированный процесс фотоэлектро-Фентон был использован при деструкции красителя кислотный красный 29 [161]. Изучено обесцвечивание активного красного 195 с помощью процесса фотоэлектро-Фентон, катализируемого оксалатом железа, с использованием электрода из углеродной бумаги в качестве катода при облучении видимым светом [162]. Комбинированный фотоэлектро-Фентон-процесс в

Т а б л и ц а 4

Оптимальные параметры удаления различных красителей с использованием системы электро-Фентон

Краситель	Анод/катод	Параметры процесса	Степень очистки, %	Ссылка
Прямой желтый 52	Ti-TiO ₂ /углеродная ткань	0,05 М Na ₂ SO ₄ ; pH 2; 0,5 мМ Fe ²⁺ ; 2 мг/л красителя	80–90	[122]
Кислотный голубой 25	графит/графит	200 мг/л красителя; Fe/M-ZSM-5 (10); 100 мг/л; 25 мМ Na ₂ SO ₄ ; 500 мА; pH 9	85–89	[142]
Основной голубой 9 Кислотный красный 14	Fe/оксид графена	0,1 г Fe ₃ O ₄ ; 0,05 М Na ₂ SO ₄ ; красители (КК 14 = 50 мг/л; ОГ 9 = 30 мг/л); pH 3	95–99	[143]
Активный бриллиантовый синий	нержавеющая сталь/графит	O ₂ 0,02 м ³ /ч; 0,05 М Na ₂ SO ₄ ; 2,0 мА/см ² ; 0,75 мМ Fe ²⁺	80	[144]
Кислотный желтый 36	допированный бором алмаз/газодиффузионный катод	108 мг/л красителя; 0,1 М Na ₂ SO ₄ + 0,5 мМ Fe ²⁺ ; pH 3; 0,1 А; 35 °С	100	[145]
Кислотный красный 18	Pt/углеродный войлок	40 мг/л Fe ₃ O ₄ ; pH 3,0; 50 мА; 50 мМ Na ₂ SO ₄	81	[146]
Прямой желтый 9	железо/нержавеющая сталь	pH 3; 0,2 А, c ₀ = 50 мг/л; 1,5 г/л Na ₂ SO ₄ ; 0,5 г/л H ₂ O ₂	80–95	[123]
Активный черный 5	допированный бором алмаз/стеклоуглеродная сетка	0,5 М Na ₂ SO ₄ ; c _{кр.} = 2×10 ⁻⁵ моль/дм ³	100	[147]
Активный черный 5	Ti/TiO ₂ -RuO ₂ -IrO ₂ /графит	pH 5,13; c _{кр.} = 50 мг/л; 15,86 мА/см ²	98	[148]
Активный красный 195	сталь/графит	c _{кр.} = 50 ppm, 2 мА/см ² , O ₂ 0,012 см ³ /с	100	[149]
Нейтральный красный	графит/графит	200 мА; Fe ²⁺ 2%; c _{кр.} = 40 мг/л; pH 3	92	[150]

основном используется для повышения эффективности разложения органических красителей как при окислении модельных соединений, так и при обработке реальных сточных вод [163].

В качестве электродных материалов при использовании процесса фотоэлектро-Фентон для удаления красителей применяют ДБА в качестве анода и углерод в виде газодиффузионного катода при одновременном облучении УФ-светом [164]. Сочетание процесса фотоэлектро-Фентона с фотокаталитическим процессом на наночастицах ZnO с удельной поверхностью (БЭТ) 32,23 м²/г и средним размером кристаллов 15 нм, иммобилизованных на стеклянных пластинах, приводит к полному обесцвечиванию раствора красителя основного желтого 28. При этом в качестве катода используется электродуглеродные нанотрубки – политетрафторэтилен (УНТ – ПТФЭ) [165].

Проведено сравнение деструкции азокрасителя активного желтого 160 с концентрацией 0,167 ммоль/дм⁻³ в сульфатной среде при pH 3,0, проведенной путем анодного окисления электрогенерированной H₂O₂, а также процессами электро-Фентон и фотоэлектро-Фентон. Последний из них оказался наиболее эффективным методом с 94%-й минерализацией [166, 167].

Окисление красителей с использованием системы соно-Фентон (H₂O₂ + Fe²⁺ + ультразвук)

Окисление красителей с использованием реактива Фентона и одновременной обработкой ультразвуком является еще одним из вариантов окисления красителей [168]. Обработка ультразвуком водных растворов приводит к акустической кавитации с последующим образованием активных радикалов [169–171].

Одновременное использование реактива Фентона и ультразвука позволяет увеличить эффективность процесса благодаря возникающему синергетическому эффекту [172, 173]. Кроме того, обработка ультразвуком позволяет не только генерировать активные радикалы, но и способствует очистке поверхности катализатора, используемого в гетерогенных реакциях разложения пероксида водорода, от отравляющих поверхность веществ [174].

В настоящее время можно выделить три направления исследований по окислению красителей с использованием ультразвука: сочетание ультразвука и гомогенного реактива Фентона (H₂O₂ + Fe²⁺) (гомогенный соно-Фентон) [172,

173, 175], сочетание ультразвука и гетерогенного реактива Фентона (твердый железосодержащий катализатор + H₂O₂) (гетерогенный соно-Фентон) [176–183] и использование ультразвуковой обработки при одновременном облучении светом и действием гомогенного реактива Фентона [168, 171, 184, 185].

Сонохимическое разложение водных растворов азобензола и родственных азокрасителей (метилловый оранжевый, *o*-метилловый красный и *n*-метилловый красный) показало, что для *o*-метилового красного оно было на 30–40% выше, чем для других соединений. При добавлении Fe(II) происходит ускорение (до трех раз) сонохимического обесцвечивания и процесса минерализации [186].

Окисление красителей с использованием Фентон-подобных гетерогенных систем (H₂O₂ + железосодержащие твердые катализаторы)

Гетерогенные Фентон-подобные системы представляют собой твердые катализаторы разложения пероксида водорода [187]. В качестве катализаторов могут выступать материалы как содержащие, так и не содержащие соединения железа [188, 189]. Использованию Фентон-подобных гетерогенных систем для удаления красителей из сточных вод посвящено большое число исследований [190–193]. Фентон-подобные гетерогенные системы позволяют исключить некоторые недостатки гомогенного процесса окисления красителей в присутствии пероксида водорода и ионов Fe²⁺. Разработано множество катализаторов, в основном железосодержащих материалов с каталитической активностью в реакции разложения пероксида водорода. Ионы Fe²⁺ или соединения железа были иммобилизованы на различные поверхности и носители, такие как мембраны [194], молекулярные сита [195–199], углеродные материалы [200–203] и твердые оксиды [204–206]. Следует отметить, что иммобилизация и устойчивость соединений железа в носителе в первую очередь должны быть связаны с предотвращением уменьшения активности катализатора и вторичного загрязнения воды. В табл. 5 приведены сравнительные данные о железосодержащих катализаторах для Фентон-подобных гетерогенных систем.

Обработка текстильных стоков физико-химическими методами обычно неэффективна для удаления азокрасителей, причем возможно генерирование более токсичных продуктов по сравнению с исходными красителями. Фентон-

Т а б л и ц а 5

Железосодержащие катализаторы для Фентон-подобных гетерогенных систем

Катализатор	Концентрация, г/л	[H ₂ O ₂], мМ	pH	Краситель	α, %	Ссылка
Зола рисовой шелухи, модифицированная Fe(III)	0,5	4	3	Активный черный 5	89,2	[207]
Допированный железом углеродный аэрогель	0,2	6	3	Оранжевый II	100	[202]
Сапонит	0,07	13	3	Оранжевый II	100	[208]
Fe/углерод	0,2	6	3	Оранжевый II	>90	[203]
Цеолиты, модифицированные железом	1,0	26,7	3,5	Активный красный 141	97	[196]
Бентонит	0,5	6,4	3	Кислотный черный 1	100	[209]
Si/Al@Fe/многослойные углеродные нанотрубки	0,2	30	4,5	Метиловый оранжевый	100	[210]
Сплав Fe ₇₈ Si ₉ B ₁₃	2,0	200–1000	2,00–6,45	Бриллиантовый красный 3В-А	98	[211]
Восстановленный оксид графена/CoFe ₂ O ₄	0,1	3,0	7,6	Метиленовый голубой	100	[212]
Fe-активированный углерод	4,1	2,25	3	Небесно-голубой Чикаго	88	[213]
Железосодержащий цеолит ZSM-5	0,15	7,5	7	Кристаллический фиолетовый	99,6	[198]
Биоуголь, пропитанный Fe	0,5	7,5	5,5	Оранжевый G	>89	[214]
Наноккомпозит оксид графена/Fe ₃ O ₄	0,1–0,3	2,75–44	2,5–6,3	Кислотный оранжевый 7	98	[215]
Латеритная почва	2,0	1,0	3	Кислотный красный 17	94,7	[216]
CoO–NiFe ₂ O ₄	0,05	5	2	Эриохром черный Т	97	[217]
Наночастицы Fe ⁰	0,3	7400	3–7	Малахитовый зеленый	>85	[218]
Fe ₃ O ₄	0,05	0,5	6	Родамин Б	99	[219]
α-FeOOH	0,125	0,55	3–10	Оранжевый II	99	[220]

подобные гетерогенные системы позволяют удалять красители из водных растворов за счет их полной минерализации. С помощью таких систем в [221] оптимизирован процесс окисления красителя дисперсного красного 343. В [222] исследовано окисление кислотного оранжевого 7 в результате гетерогенного каталитического процесса с перекисью водорода. Полное обесцвечивание достигалось менее чем за 4 ч при использовании в качестве катализатора сапонитовой глины, пропитанной ацетилацетонатом Fe(II) (16 мас.% железа).

Возможность обесцвечивания азокрасителя красный 3BN с использованием природного гематита в присутствии пероксида водорода продемонстрирована в работе [223]. Кроме того, хорошую эффективность при окислении красителей показывает использование природных материалов в качестве катализаторов разложения пероксида водорода. Так, в [224] с помощью процесса Фентона изучено разложение смеси красителей (смесь лазурного В и конго красного) с использованием в качестве катализатора чернозема, содержащего железо. Отдельно было исследовано влияние прокаливания и старения катализатора на разложение смешанного красителя, в оптимизированных условиях наблюдалась его значительная деградация (>90% за 10 мин) [224].

Приведены данные об использовании ферроцена (Fc) в качестве катализатора гетерогенной реакции Фентона разложения метиленового синего. Степень удаления метиленового синего достигла 99,50% после того, как Fc последовательно использовали в течение трех циклов. Это указывает на стабильность Fc и возможность его повторного использования [225]. Катионный краситель Родамин В (RhB) также может быть эффективно окислен с использованием гетерогенной реакции, подобной процессу Фентона, которая катализируется природной глиной [226]. Таким образом, последние исследования в области гетерогенных Фентон-подобных процессов окисления органических красителей свидетельствуют об устойчивом росте интереса исследователей к использованию различных природных железосодержащих минералов в качестве катализаторов разложения пероксида водорода с генерированием гидроксильного радикала.

Заключение

Органические красители содержатся в сточных водах, сброс которых приводит к загрязнению окружающей среды. Синтетические красители устойчивы к биологическому разложению. Поэтому для их удаления из сточных вод используют физико-химические методы. Использование реактива Фентона и процессов, основанных на генерировании гидроксильных радикалов при каталитическом разложении пероксида водорода с использованием различных подходов, имеет хорошие перспективы для разработки современных технологий очистки сточных вод, содержащих не только красители, но и другие органические соединения. Наиболее сложной проблемой удаления красителей с использованием различных окислительных процессов, основанных на применении реактива Фентона (фото-Фентон, соно-Фентон, электро-Фентон, фотоэлектро-Фентон, Фентон-подобные гетерогенные системы) является оптимизация различных параметров, поскольку большинство окислительных процессов зависит от многих факторов, таких как pH, температура, концентрация окислителя, начальная концентрация красителей и время реакции. Путем оптимизации эксплуатационных параметров каталитическая активность при окислении красителей может быть в той или иной степени улучшена.

Следует отметить, что при исследовании гетерогенных Фентон-подобных катализаторов особое внимание уделяется получению устойчивых к выщелачиванию железа материалов, обладающих и высокой каталитической активностью, и низкой стоимостью. Выщелачивание железа приводит к падению активности и срока эксплуатации катализатора, а также к вторичному загрязнению сточных вод солями железа. Фентон-подобные гетерогенные системы имеют хорошую перспективу в ближайшем будущем, поскольку обладают рядом привлекательных свойств, таких как переработка катализатора при исчерпании эксплуатационного ресурса, легкое разделение сточных вод и катализатора в случае, если он обладает магнитными свойствами, относительно низкая стоимость и т.д. Физические воздействия (фото-, электро-, кавитационные, магнитные, микроволновые) могут оказывать синергетическое влияние на протекание процессов окисления органических красителей с использованием Фентон-подобных систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Garrido-Cardenas J.A., Esteban-García B., Agüera A., Sánchez-Pérez J.A., Manzano-Agugliaro F. // *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2019. Vol. 17. N 1. P. 170.
- Bisschops I., Spanjers H. // *Environ. Technol.* 2003. Vol. 24. N 11. P. 1399.
- Yaseen D.A., Scholz M. // *Int. J. Envir. Sci. Technol.* 2019. Vol. 16. № 2. P. 1193.
- Pavithra K.G., Grace K., Jaikumar V. // *J. Ind. Eng. Chem.* 2019. Vol. 75. P. 1.
- Paździor K., Bilińska L., Ledakowicz S. // *Chem. Eng. J.* 2019. Vol. 376.
- Blanco J., Torrades F., De la Varga M., García-Montaño J. // *Desalination*. 2012. Vol. 286. P. 394.
- Divyapriya G., Nambi I.M., Senthilnathan J. // *J. Bionanoscience*. 2016. Vol. 10. N 5. P. 356.
- Paździor K., Bilińska L., Ledakowicz S. // *Chem. Eng. J.* 2019. Vol. 376. P. 120597.
- Chan S.H.S., Yeong Wu T., Juan J.C., Teh C.Y. // *J. Chem. Tech. Biotech.* 2011. Vol. 86. N 9. P. 1130.
- Choi M.Y. // *Molecules*. 2019. Vol. 24. N 18. P. 3341.
- Moreira F.C., Boaventura R.A., Brillas E., Vilar V.J. // *Appl. Catal. B: Environ.* 2017. Vol. 202. P. 217.
- Sirés I., Brillas E., Oturan M.A., Rodrigo M. A., Panizza M. // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2014. Vol. 21. N 14. P. 8336.
- Ikehata K., El-Din M.G. // *Ozone: Science and Engineering*. 2005. Vol. 27. N 3. P. 173.
- Ikehata K., El-Din M.G. // *Ozone: Science and Engineering*. 2005. Vol. 27. N 2. P. 83.
- Pignatello J.J., Oliveros E., MacKay A. // *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 2006. Vol. 36. N 1. P. 1.
- A Al-Kdasi A.I.K.S.C.G. // *Glob. NEST J.* 2013. Vol. 6. N 3. P. 222.
- Miklos D.B., Remy C., Jekel M., Linden K. G., Drewes J.E., Hübner U. // *Water Research*. 2018. Vol. 139. P. 118.
- Asghar A., Raman A.A.A., Daud W.M.A.W. // *Journal of Cleaner Production*. 2015. Vol. 87. N 1. P. 826.
- Dang T.T., Do V.M., Trinh V.T. // *Current Pollution Reports*. 2020. Vol. 6. N 3. P. 217.
- Oller I., Malato S., Sánchez-Pérez J.A. // *Science of the Total Environment*. 2011. Vol. 409. N 20. P. 4141.
- Nidheesh P. V., Gandhimathi R. // *Desalination*. 2012. Vol. 299. P. 1.
- Ma J., Song W., Chen C., Ma W., Zhao J., Tang Y. // *Environ. Sci. Technol.* 2005. Vol. 39. N 15. P. 5810.
- Pliego G., Zazo J.A., Garcia-Muñoz P., Munoz M., Casas J.A., Rodriguez J.J. // *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 2015. Vol. 45. N 24. P. 2611.
- Neyens E., Baeyens J. // *J. Hazard. Mater.* 2003. Vol. 98. N 1–3. P. 33.
- Asghar A., Raman A.A.A., Daud W.M.A.W. // *Journal of Cleaner Production*. 2015. Vol. 87. N 1. P. 826.
- Mansoorian H.J., Bazrafshan E., Yari A., Alizadeh M. // *Health Scope*. 2014. Vol. 3. N 2. P. 15507.
- Abou-Elela S.I., Ali M.E.M., Ibrahim H.S. // *Arab. J. Chem.* 2016. Vol. 9. N 4. P. 511.
- Pouran S.R., Bayrami A., Shafeeyan M.S., Raman A.A.A., Daud W.M.A. // *Acta Chim. Slov.* 2018. Vol. 65. N 1. P. 166.
- Khan N.U.H., Iqbal M., Nazir A. // *Zeitschrift fur Phys. Chemie*. 2019. Vol. 233. N 3. P. 361.
- Deshannavar U.B., Singa P.K., Gaonkar D., Gayathri A., Patil A., Malade L.V. // *Materials Today: Proceedings*. 2018. Vol. 24. P. 1011.
- Ertugay N., Acar F.N. // *Arab. J. Chem.* 2017. Vol. 10. P. S1158.
- Lodha B., Chaudhari S. // *J. Hazard. Mater.* 2007. Vol. 148. N 1–2. P. 459.
- M'Arimi M.M., Mecha C.A., Kiprop A.K., Ramkat R. // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020. Vol. 121. P. 109669.
- Lucas M.S., Peres J.A. // *Dye. Pigment*. 2006. Vol. 71. N 3. P. 236.
- Santana C.S., Velloso C.C.V., Aguiar A. // *Quim. Nova*. 2019. Vol. 42. N 2. P. 149.
- Sun J.H., Shi S.H., Lee Y.F., Sun S.P. // *Chem. Eng. J.* 2009. Vol. 155. N 3. P. 680.
- Wang S. // *Dye. Pigment*. 2008. Vol. 76. N 3. P. 714.
- Rodrigues C.S.D., Madeira L.M., Boaventura R.A.R. // *J. Hazard. Mater.* 2009. Vol. 164. N 2–3. P. 987.
- Ramirez J.H., Costa C.A., Madeira L.M. // *Catal. Today*. 2005. Vol. 107–108. P. 68.
- Suhan M.B.K., Mahtab S.T., Aziz W., Akter S., Islam M.S. // *Case Stud. Chem. Environ. Eng.* 2021. Vol. 4. P. 100126.
- Saleh R., Taufik A. // *Sep. Purif. Technol.* 2019. Vol. 210. P. 563.
- Fernandes N.C., Brito L.B., Costa G.G., Taveira S.F., Cunha-Filho M.S.S., Oliveira G.A.R., Marreto R.N. // *Chem. Biol. Interact.* 2018. Vol. 291. P. 47.
- Hameed B.H., Lee T.W. // *J. Hazard. Mater.* 2009. Vol. 164. N 2–3. P. 468.
- Elhalil A., Tounsadi H., Elmoubarki R., Mahjoubi F.Z., Farnane M., Sadiq M., Abdennouri M., Qourzal S., Barka N. // *Water Resour. Ind.* 2016. Vol. 15. P. 41.
- Sun J.H., Sun S.P., Wang G.L., Qiao L.P. // *Dye. Pigment*. 2007. Vol. 74. N 3. P. 647.
- Liu R., Chiu H.M., Shiau C.S., Yeh R.Y.L., Hung Y.T. // *Dye. Pigment*. 2007. Vol. 73. N 1. P. 1.
- Fan H.J., Huang S.T., Chung W.H., Jan J.L., Lin W.Y., Chen C.C. // *J. Hazard. Mater.* 2009. Vol. 171. N 1–3. P. 1032.
- Hayat H., Mahmood Q., Pervez A., Bhatti Z.A., Baig S.A. // *Sep. Purif. Technol.* 2015. Vol. 154. P. 149–153.

49. Fongsatitkul P., Elefsiniotis P., Yamasmit A., Yamasmit N. // *Biochem. Eng. J.* 2004. Vol. 21. N 3. P. 213.
50. Eslami A., Moradi M., Ghanbari F., Mehdipour F. // *J. Environ. Heal. Sci. Eng.* 2013. Vol. 11. N 1. P. 1.
51. Solomon D., Kiflie Z., Van Hulle S. // *Nanotechnol. Environ. Eng.* 2020. Vol. 5. N 1. P. 7.
52. Sharma S., Kapoor S., Christian R.A. // *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 2017. Vol. 14. N 8. P. 1665.
53. Rodrigues C.S.D., Madeira L.M., Boaventura R.A.R. // *J. Environ. Chem. Eng.* 2014. Vol. 2. N 2. P. 1027.
54. Rodrigues C.S.D., Madeira L.M., Boaventura R.A.R. // *J. Hazard. Mater.* 2009. Vol. 172. N 2–3. P. 1551.
55. Oturan M.A., Aaron J.J. // *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 2014. Vol. 44. N 23. P. 2577.
56. Javaid R., Qazi U.Y. // *Int. J. Environ. Res. Public Heal.* 2019, Vol. 16, P. 2066.
57. Xu Y. // *Chemosphere.* 2001. Vol. 43. N 8. P. 1103.
58. Zheng H., Pan Y., Xiang X. // *J. Hazard. Mater.* 2007. Vol. 141. N 3. P. 457.
59. Huang Y.H., Huang Y.F., Chang P.S., Chen C.Y. // *J. Hazard. Mater. Elsevier*, 2008. Vol. 154. N 1–3. P. 655.
60. Núñez L., García-Hortal J.A., Torrades F. // *Dye. Pigment.* 2007. Vol. 75. N 3. P. 647.
61. Katsumata H., Koike S., Kaneco S., Suzuki T., Ohta K. // *J. Environ. Sci.* 2010. Vol. 22. N 9. P. 1455.
62. Li X., Rykov A.I., Sharma V.K., Wei H., Jin C., Xin Liu, Mingrun Li, Songhua Yu, Chenglin Sun, Dionysiou D.D. // *Catal. Sci. Technol.* 2014. Vol. 5. N 1. P. 504.
63. Monteagudo J.M., Durán A., López-Almodóvar C. // *Appl. Catal. B Environ.* 2008. Vol. 83. N 1–2. P. 46.
64. Tarkwa J.B., Oturan N., Acayanka E., Laminsi S., Oturan M. // *Environ. Chem. Lett.* 2019. Vol. 17. N 1. P. 473.
65. Wang Y., Priambodo R., Zhang H., Huang Y.H. // *RSC Adv.* 2015. Vol. 5. N 56. P. 45276.
66. Liu S.Q., Feng L.R., Xu N., Chen Z.G., Wang X.M. // *Chem. Eng. J.* 2012. Vol. 203. P. 432.
67. Zhao Y., Kang S., Qin L., Wang W., Zhang T., Song S., Komarneni S. // *Chem. Eng. J.* 2020. Vol. 379. P. 122322.
68. Chen S., Wu Y., Li G., Wu J., Meng G., Guo X., Liu Z. // *Appl. Clay Sci.* 2017. Vol. 136. P. 103.
69. Dias F.F., Oliveira A.A., Arcanjo A.P., Moura F.C., Pacheco J.G. // *Appl. Catal. B Environ.* 2016. Vol. 186. P. 136.
70. da Silva Leite L., de Souza Maselli B., de Aragão Umbuzeiro G., Nogueira R.F.P. // *Chemosphere.* 2016. Vol. 148. P. 511.
71. Isaev A. B., Alieva M. A., Idrisova A. K. // *Butlerov Communications.* 2018. T. 53. N 2. P. 104.
72. Bokhari T.H., Ahmad N., Jilani M.I., Saeed M., Usman M., Haq A.U., Javed T. // *Mater. Res. Express.* 2020. Vol. 7. N 1. P. 015531.
73. do Nascimento G.E., Napoleão D.C., de Aguiar Silva P.K., da Rocha Santana R.M., Bastos A.M.R., Zaidan L.E.M.C., Duarte M.M.M.B. // *Water. Air. Soil Pollut.* 2018. Vol. 229. N 12. P. 379.
74. de Moraes N.F.S., Santana R.M., Gomes R.K., Júnior S.G.S., de Lucena A.L., Zaidan L.E., Napoleão D.C. // *Chem. Pap.* 2020. Vol. 1. P. 3.
75. Ramos R.O., Albuquerque M.V., Lopes W.S., Sousa J.T., Leite V.D. // *J. Water Process Eng.* 2020. Vol. 37. P. 101535.
76. da Rocha Santana R.M., do Nascimento G.E., Napoleão D.C., Duarte M.M.M.B. // *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental.* 2017. Vol. 21. N 2. P. 104.
77. Thomas S., Sreekanth R., Sijumon V.A., Aravind U.K., Aravindakumar C.T. // *Chem. Eng. J.* 2014. Vol. 244. P. 473.
78. Clarizia L., Russo D., Di Somma I., Marotta R., Andreozzi R. // *Appl. Catal. B Environ.* 2017. Vol. 209. P. 358.
79. He J., Tao X., Ma W., Zhao J. // *Chemistry Letters.* 2002. Vol. 31. N 1. C. 86.
80. Klammerth N., Malato S., Agüera A., Fernández-Alba A. // *Water Res.* 2013. Vol. 47. N 2. P. 833.
81. Hartmann M., Kullmann S., Keller H. // *J. Mater. Chem.* 2010. Vol. 20. N 41. P. 9002.
82. Moradi M., Elahinia A., Vasseghian Y., Dragoi E.N., Omid F., Khaneghah A.M. // *J. Environ. Chem. Eng.* 2020. Vol. 8. N 5. P. 104330.
83. Soon A.N., Hameed B.H. // *Desalination.* 2011. Vol. 269. N 1–3. P. 1.
84. Lan H., Wang A., Liu R., Liu H., Qu J. // *J. Hazard. Mater. Elsevier*, 2015. Vol. 285. P. 167.
85. Isaev A.B., Shabanov N.S., Orudzhev F.F., Giraev K.M., Emirov R.M. // *J. Nanosci. Nanotechnol.* 2017. Vol. 17. N 7. P. 4498.
86. Zhou L., Lei J., Wang L., Liu Y., Zhang J. // *Appl. Catal. B Environ.* 2018. Vol. 237. P. 1160.
87. Ben Ayed S., Azam M., Al-Resayes S.I., Ayari F., Rizzo L. // *Catalysts.* 2021. Vol. 11. N 11. P. 1358.
88. Liu Y., Jin W., Zhao Y., Zhang G., Zhang W. // *Appl. Catal. B Environ.* 2017. Vol. 206. P. 642.
89. Amorim C.C., Leão M.M., Moreira R.F., Fabris J.D., Henriques A.B. // *Chem. Eng. J.* 2013. Vol. 224. N 1. P. 59.
90. Devi L.G., Raju K.A., Kumar S.G., Rajashekar K.E. // *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.* 2011. Vol. 42. N 2. P. 341.
91. Brindha R., Muthuselvam P., Senthilkumar S., Rajaguru P. // *Chemosphere.* 2018. Vol. 201. P. 77.
92. Hernández-Oloño J.T., Infantes-Molina A., Vargas-Hernández D., Domínguez-Talamantes D.G., Rodríguez-Castellón E., Herrera-Urbina J.R., Tánori-Córdova J.C. // *J. Photochem. Photobiol. A Chem.* 2021. Vol. 421. P. 113529.
93. Kasiri M.B., Aleboye H., Aleboye A. // *Appl. Catal. B Environ.* 2008. Vol. 84. N 1–2. P. 9.

94. Guo S., Zhang G., Wang J. // *J. Colloid Interface Sci.* 2014. Vol. 433. P. 1.
95. Zhang X., Geng Z., Jian J., He Y., Lv Z., Liu X., Yuan H. // *Catalysts*. 2020. Vol. 10. N 3. P. 293.
96. Ye Y., Yang H., Wang X., Feng W. // *Mater. Sci. Semicond. Process.* 2018. Vol. 82. P. 14.
97. Severo E.D.C., Anchieta C.G., Foletto V.S., Kuhn R.C., Collazzo G.C., Mazutti M.A., Foletto E.L. // *Water Sci. Technol.* 2016. Vol. 73. N 1. P. 88.
98. Ramos R.O., Albuquerque M.V., Lopes W.S., Sousa J.T., Leite V.D. // *J. Water Process Eng.* 2020. Vol. 37. P. 101535.
99. Bouafia-Chergui S., Oturan N., Khalaf H., Oturan M.A. // *J. Env. Sci. Heal. A.* 2010. Vol. 45. N 5. P. 622.
100. García-Montaña J., Pérez-Estrada L., Oller I., Maldonado M.I., Torrades F., Peral J. // *J. Photochem. Photobiol. A Chem.* 2008. Vol. 195. N 2–3. P. 205.
101. Monteagudo J.M., Durán A., San Martín I., Aguirre M. // *Appl. Catal. B Environ.* 2009. Vol. 89. N 3–4. P. 510.
102. Maezono T., Tokumura M., Sekine M., Kawase Y. // *Chemosphere*. 2011. Vol. 82. N 10. P. 1422.
103. Macías-Sánchez J., Hinojosa-Reyes L., Guzmán-Mar J.L., Peralta-Hernández J.M., Hernández-Ramírez A. // *Photochem. Photobiol. Sci.* 2011. Vol. 10. N 3. P. 332.
104. Lee J.M., Kim M.S., Hwang B., Bae W., Kim B.W. // *Dye. Pigment*. 2003. Vol. 56. N 1. P. 59.
105. Xu Z., Liang J., Zhou L. // *J. Alloys Compd.* 2013. Vol. 546. P. 112.
106. Neamtu M., Yediler A., Siminiceanu I., Kettrup A. // *J. Photochem. Photobiol. A Chem.* 2003. Vol. 161. N 1. P. 87.
107. García-Montaña J., Ruiz N., Muñoz I., Domenech X., García-Hortal J.A., Torrades F., Peral J. // *J. Hazard. Mater.* 2006. Vol. 138. N 2. P. 218.
108. Kusic H., Koprivanac N., Srsan L. // *J. Photochem. Photobiol. A Chem.* 2006. Vol. 181. N 2–3. P. 195.
109. Trovó A.G., Hassan A.K., Sillanpää M., Tang W.Z. // *Int. J. Env. Sci. Technol.* 2016. Vol. 13. N 1. P. 147.
110. Chacó J.M., Leal M.T., Sánchez M., Bandala E.R. // *Dye. Pigment*. 2006. Vol. 69. N 3. P. 144.
111. Durán A., Monteagudo J.M., Amores E. // *Appl. Catal. B Environ.* 2008. Vol. 80. N 1–2. P. 42.
112. Ahmed Y., Yaakob Z., Akhtar P. // *Catal. Sci. Technol.* 2016. Vol. 6. N 4. P. 1222.
113. Kirchon A., Zhang P., Li J., Joseph E.A., Chen W., Zhou H.C. // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2020. Vol. 12. N 8. P. 9292.
114. Al-Kahtani A.A., Abou Taleb M.F. // *J. Hazard. Mater.* 2016. Vol. 309. P. 10.
115. Liu T., You H., Chen Q. // *J. Hazard. Mater.* 2009. Vol. 162. N 2–3. P. 860.
116. Zhang H., Zhang D., Zhou J. // *J. Hazard. Mater.* 2006. Vol. 135. N 1–3. P. 106.
117. Ramirez J.H., Costa C.A., Madeira L.M., Mata G., Vicente M.A., Rojas-Cervantes M.L., López-Peinado A.J., Martín-Aranda R.M. // *Appl. Catal. B Environ.* 2007. Vol. 71. N 1–2. P. 44.
118. Isaev A.B., Aliev Z.M. // *Russ. J. Appl. Chem.* 2012. Vol. 85. N 5. P. 776.
119. Qiu S., He D., Ma J., Liu T., Waite T.D. // *Electrochim. Acta*. 2015. Vol. 176. P. 51.
120. Sennaoui A., Alahiane S., Sakr F., Assabbane A., Addi E.H.A., Hamdani M. // *Port. Electrochim. Acta*. 2018. Vol. 36. N 3. P. 163.
121. Kuleyin A., Gök A., Akbal F. // *J. Environ. Chem. Eng.* 2021. Vol. 9. N 1. P. 104782.
122. Peralta-Hernández J.M., Meas-Vong Y., Rodríguez F.J., Chapman T.W., Maldonado M.I., Godínez L.A. // *Water Res.* 2006. Vol. 40. N 9. P. 1754.
123. Kourdali S., Badis A., Boucherit A. // *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2014. Vol. 110. P. 110.
124. Ramirez-Pereda B., Álvarez-Gallegos A., Bustos-Terrones Y.A., Silva-Martínez S., Hernández-Pérez A. // *J. Water Process Eng.* 2020. Vol. 37. P. 101434.
125. Brillas E., Martínez-Huitle C.A. // *Applied Catalysis B: Environmental*. 2015. Vol. 166–167. P. 603.
126. Brillas E., Sirés I., Oturan M.A. // *Chem. Rev.* 2009. Vol. 109. N 12. P. 6570.
127. Ganiyu S.O., Zhou M., Martínez-Huitle C.A. // *Applied Catalysis B: Environmental*, 2018. Vol. 235. P. 103.
128. Nidheesh P. V., Gandhimathi R. // *Desalination*. 2012. Vol. 299. P. 1.
129. He H., Zhou Z. // *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 2017. Vol. 47. N 21. P. 2100.
130. Peralta-Hernández J., Martínez-Huitle C.A., Guzmán-Mar J.L., Hernández-Ramírez A. // *J. Environ. Eng. Manag.* 2009. Vol. 19. N 5. P. 257.
131. Wang Z., Liu M., Xiao F., Postole G., Zhao H., Zhao G. // *Chinese Chem. Lett.* 2022. Vol. 33, N. 2. P. 653.
132. Lahkimi A., Oturan M.A., Oturan N., Chaouch M. // *Environ. Chem. Lett.* 2007. Vol. 5. N 1. P. 35.
133. Brillas E. // *Sep. Purif. Technol.* 2022. Vol. 284. P. 120290.
134. Bañuelos J.A., García-Rodríguez O., Rodríguez-Valadez F.J., Godínez L.A. // *J. Electrochem. Soc.* 2015. Vol. 162. N 9. P. E154.
135. Wang C.T., Chou W.L., Chung M.H., Kuo Y.M. // *Desalination*. 2010. Vol. 253. N 1–3. P. 129.
136. García-Rodríguez O., Bañuelos J.A., El-Ghenymy A., Godínez L.A., Brillas E., Rodríguez-Valadez F.J. // *J. Electroanal. Chem.* 2016. Vol. 767. P. 40.
137. El-Ghenymy A., Centellas F., Rodríguez R.M., Cabot P.L., Garrido J.A., Sirés I., Brillas E. // *Electrochim. Acta*. 2015. Vol. 182. P. 247.
138. Alcocer S., Picos A., Uribe A.R., Pérez T., Peralta-Hernández J.M. // *Chemosphere*. 2018. Vol. 205. P. 682.
139. dos Santos A.J., Sirés I., Martínez-Huitle C. A., Brillas E. // *Chemosphere*. 2018. Vol. 210. P. 1137.

140. Khataee A.R., Vahid B., Behjati B., Safarpour M. // *Environ. Prog. Sustain. Energy*. 2013. Vol. 32. N 3. P. 557.
141. Khataee A., Vahid B., Behjati B., Safarpour M., Joo S.W. // *Chem. Eng. Res. Des.* 2014. Vol. 92. N 2. P. 362.
142. Ahmadi Zahrani A., Ayati B. // *J. Electroanal. Chem.* 2020. Vol. 873. P. 114456.
143. Akerdi A.G., Es'haghzade Z., Bahrami S.H., Arami M. // *J. Environ. Chem. Eng.* 2017. Vol. 5. N 3. P. 2313.
144. Xu X., Chen J., Zhang G., Song Y., Yang F. // *Int. J. Electrochem. Sci.* 2014. Vol. 9. N 2. P. 569.
145. Ruiz E.J., Arias C., Brillas E., Hernández-Ramírez A., Peralta-Hernández J.M. // *Chemosphere*. 2011. Vol. 82. N 4. P. 495.
146. Ben Hafaiedh N., Arias C., Brillas E., Hernández-Ramírez A., Peralta-Hernández J.M. // *Environ. Technol.* 2020. Vol. 41. N 16. P. 2146.
147. Vasconcelos V.M., Ponce-de-León C., Nava J.L., Lanza M.R. // *J. Electroanal. Chem.* 2016. Vol. 765. P. 179.
148. Iranpour F., Pourzamani H., Mengelizadeh N., Bahrami P., Mohammadi H. // *J. Environ. Chem. Eng.* 2018. Vol. 6. N 2. P. 3418.
149. Elbatae A.A., Nosier S.A., Zatout A.A., Hassan I., Sedahmed G.H., Abdel-Aziz M.H., El-Naggar M.A. // *J. Water Process Eng.* 2021. Vol. 41. P. 102042.
150. Ebratkhahan M., Hamed S.N., Zarei M., Jafarizad A., Rostamizadeh M. // *Electrocatalysis*. 2021. Vol. 12. N 5. P. 579.
151. Garcia-Segura S., Brillas E. // *J. Photochem. Photobiol. Photochem. Rev.* 2017. Vol. 31. P. 1.
152. Isaev A.B., Aliev Z.M., Adamadzieva N.A. // *Russ. J. Appl. Chem.* 2012. Vol. 85. N 5. P. 755.
153. Isaev A.B., Shabanov N.S., Orudzhev F.F. // *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 2018. Vol. 15. N 8. P. 1609.
154. Brillas E. // *Chemosphere*. 2020. Vol. 250. P. 126198.
155. Laghrib F., Bakasse M., Lahrich S., El Mhammedi M.A. // *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*. 2021. Vol. 101. N 15. P. 2947.
156. Espinoza C., Romero J., Villegas L., Cornejo-Ponce L., Salazar R. // *J. Hazard. Mater.* 2016. Vol. 319. P. 24.
157. dos Santos A.J., de Araújo Costa E.C.T., da Silva D.R., Garcia-Segura S., Martínez-Huitle C.A. // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2018. Vol. 25. N 7. P. 7002.
158. Garcia-Segura S., Brillas E. // *Appl. Catal. B Environ.* 2016. Vol. 181. P. 681.
159. Garcia-Segura S., Brillas E. // *Electrochim. Acta*. 2014. Vol. 140. P. 384.
160. Florenza X., Solano A.M.S., Centellas F., Martínez-Huitle C.A., Brillas E., Garcia-Segura S. // *Electrochim. Acta*. 2014. Vol. 142. P. 276.
161. Almeida L.C., Silva B.F., Zanoni M.V.B. // *J. Electroanal. Chem.* 2014. Vol. 734. P. 43.
162. Djafarzadeh N., Zarei M., Behjati B., Khataee A.R. // *Res. Chem. Intermed.* 2013. Vol. 39. N 7. P. 3355.
163. Almeida L.C., Silva B.F., Zanoni M.V.B. // *Chemosphere*. 2015. Vol. 136. P. 63.
164. Almeida L.C., Garcia-Segura S., Arias C., Bocchi N., Brillas E. // *Chemosphere*. 2012. Vol. 89. N 6. P. 751.
165. Iranifam M., Zarei M., Khataee A.R. // *J. Electroanal. Chem.* 2011. Vol. 659. N 1. P. 107.
166. Bedolla-Guzman A., Sirés I., Thiam A., Peralta-Hernández J.M., Gutiérrez-Granados S., Brillas E. // *Electrochim. Acta*. 2016. Vol. 206. P. 307.
167. Borràs N., Arias C., Oliver R., Brillas E. // *J. Electroanal. Chem.* 2013. Vol. 689. P. 158.
168. Dükkanci M., Vinatoru M., Mason T.J. // *Ultrason. Sonochem.* 2014. Vol. 21. N 2. P. 846.
169. Ince N.H. // *Ultrason. Sonochem.* 2018. Vol. 40. P. 97.
170. Al-Bsoul A., Al-Shannag M., Tawalbeh M., Al-Taani A.A., Lafi W.K., Al-Othman A., Alsheyab M. // *Sci. Total Environ.* 2020. Vol. 700. P. 134576.
171. Moradi M., Elahinia A., Vasseghian Y., Dragoi E.N., Omidi F., Khaneghah A. M. // *J. Environ. Chem. Eng.* 2020. Vol. 8. N 5. P. 104330.
172. Siddique M., Farooq R., Price G.J. // *Ultrason. Sonochem.* 2014. Vol. 21. N 3. P. 1206.
173. Cai M., Su J., Lian G., Wei X., Dong C., Zhang H., Jin M., Wei Z. // *Ultrason Sonochem.* 2016. Vol. 31. P. 93.
174. Saleh R., Taufik A. // *Sep. Purif. Technol.* 2019. Vol. 210. P. 563.
175. Maleki A., Daraei H., Hosseini E.A., Azizi S., Faez E., Gharibi F. // *Arab. J. Sci. Eng.* 2015. Vol. 40. N 2. P. 295.
176. Jaafarzadeh N., Takdastan A., Jorfi S., Ghanbari F., Ahmadi M., Barzegar G. // *J. Mol. Liq.* 2018. Vol. 256. P. 462.
177. Li G., Qiu S., Ma F., Ji Y., Jiang X. // *Anal. Methods*. 2018. Vol. 10. N 32. P. 3976–3983.
178. Shokoofehpoor F., Chaibakhsh N., Ghanadzadeh Gilani A. // *Sep. Sci. Technol.* 2019. Vol. 54. N 17. P. 2943.
179. Hassani A., Çelikdağ G., Eghbali P., Sevim M., Karaca S., Metin, Ö. // *Ultrason. Sonochem.* 2018. Vol. 40. P. 841.
180. Hassani A., Karaca C., Karaca S., Khataee A., Açıışlı Ö., Yılmaz B. // *Ultrason. Sonochem.* 2018. Vol. 42. P. 390.
181. Chu J.H., Kang J.K., Park S.J., Lee C.G. // *J. Water Process Eng.* 2020. Vol. 37. P. 101455.
182. Khataee A., Gholami P., Vahid B., Joo S.W. // *Ultrason. Sonochem.* 2016. Vol. 32. P. 357.
183. Nas M.S., Kuyuldar E., Demirkan B., Calim-

- li M.H., Demirbaş O., Sen F. // *Sci. Rep.* 2019. Vol. 9. N 1. P. 1.
184. Yosofi Y., Mousavi S.A. // *Desalin. Water Treat.* 2020. Vol. 174. P. 354.
185. Basturk E., Karatas M. // *Ultrason. Sonochem.* 2014. Vol. 21. N 5. P. 1881.
186. Joseph J.M., Destailats H., Hung H.M., Hoffmann M.R. // *J. Phys. Chem. A.* 2000. Vol. 104. N 2. P. 301.
187. Tahir M.B., Nawaz T., Nabi G., Sagir M., Shehzad M.A., Yasmin A., Hussain S., Bhatti P., Ahmed A., Gilani S.S.A. // *International Journal of Environmental Analytical Chemistry.* 2021. Vol. 101. N 14. P. 2016.
188. Wang N., Zheng T., Zhang G., Wang P. // *J. Environ. Chem. Eng.* 2016. Vol. 4. N 1. P. 762.
189. Bokare A.D., Choi W. // *J. Hazard. Mater.* 2014. Vol. 275. P. 121.
190. Garrido-Ramírez E.G., Theng B.K.G., Mora M.L. // *Appl. Clay Sci.* 2010. Vol. 47. N 3–4. P. 182.
191. Wu H., Dou X., Deng D., Guan Y., Zhang L., He G. // *Environ. Technol.* 2012. Vol. 33. N 14. P. 1545.
192. Rivera F.L., Recio F.J., Palomares F.J., Sánchez-Marcos J., Menéndez N., Mazarío E., Herrasti P. // *J. Electroanal. Chem.* 2020. Vol. 879. P. 114773.
193. Cai M.Q., Zhu Y.Z., Wei Z.S., Hu J.Q., Pan S.D., Xiao R.Y., Dong Y., Jin M.C. // *Sci. Total Environ.* 2017. Vol. 580. P. 966.
194. Zhang Y., Xiong Y., Tang Y., Wang Y. // *J. Hazard. Mater.* 2013. Vol. 244–245. P. 758.
195. Lam F.L.Y., Hu X. // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2013. Vol. 52. N 20. P. 6639.
196. Yaman Y.C., Gündüz G., Dükkancı M. // *Color. Technol.* 2013. Vol. 129. N 1. P. 69.
197. Rache M.L., García A.R., Zea H.R., Silva A.M., Madeira L.M., Ramírez J.H. // *Appl. Catal. B Environ.* 2014. Vol. 146. P. 192.
198. Ünnü B.A., Gündüz G., Dükkancı M. // *Desalin. Water Treat.* 2016. Vol. 57. N 25. P. 11835.
199. Song H., Chen C., Zhang H., Huang J. // *J. Environ. Chem. Eng.* 2016. Vol. 4. N 1. P. 460.
200. Wang L., Yao Y., Zhang Z., Sun L., Lu W., Chen W., Chen H. // *Chem. Eng. J.* 2014. Vol. 251. P. 348.
201. Zhang C., Zhou L., Yang J., Yu X., Jiang Y., Zhou M. // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2014. Vol. 21. N 14. P. 8398.
202. Duarte F., Maldonado-Hódar F.J., Pérez-Cadenas A.F., Madeira L.M. // *Appl. Catal. B Environ.* 2009. Vol. 85. N 3–4. P. 139.
203. Ramirez J.H., Maldonado-Hódar F.J., Pérez-Cadenas A.F., Moreno-Castilla C., Costa C.A., Madeira L.M. // *Appl. Catal. B Environ.* 2007. Vol. 75. N 3–4. P. 312.
204. Vu A.T., Xuan T.N., Lee C.H. // *J. Water Process Eng.* 2019. Vol. 28. P. 169.
205. Fang Z., Zhang K., Liu J., Fan J.Y., Zhao Z.W. // *Water Sci. Eng.* 2017. Vol. 10. N 4. P. 326.
206. Liu X., Sun C., Chen L., Yang H., Ming Z., Bai Y., Feng S., Yang S. // *Mater. Chem. Phys.* 2018. Vol. 213. P. 231.
207. Ersöz G. // *Appl. Catal. B Environ.* 2014. Vol. 147. P. 353.
208. Herney-Ramirez J., Lampinen M., Vicente M.A., Costa C.A., Madeira L.M. // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2008. Vol. 47. N 2. P. 284.
209. Yip A.C.K., Lam F.L.Y., Hu X. // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2005. Vol. 44. N 21. P. 7983.
210. Arshadi M., Abdolmaleki M.K., Mousavinia F., Khalafinezhad A., Firouzabadi H., Gil A. // *Chem. Eng. Res. Des.* 2016. Vol. 112. P. 113.
211. Jia Z., Zhang W.C., Wang W.M., Habibi D., Zhang L.C. // *Appl. Catal. B Environ.* 2016. Vol. 192. P. 46.
212. Wu Q., Zhang H., Zhou L., Bao C., Zhu H., Zhang Y. // *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.* 2016. Vol. 67. P. 484.
213. Mesquita I., Matos L.C., Duarte F., Maldonado-Hódar F.J., Mendes A., Madeira L.M. // *J. Hazard. Mater.* 2012. Vol. 237–238. P. 30.
214. Park J.H., Wang J.J., Xiao R., Tafti N., DeLaune R.D., Seo D.C. // *Bioresour. Technol.* 2018. Vol. 249. P. 368.
215. Zubir N.A., Yacou C., Zhang X., da Costa J.C.D. // *J. Environ. Chem. Eng.* 2014. Vol. 2. N 3. P. 1881.
216. Khataee A., Salahpour F., Fathinia M., Seyyedi B., Vahid B. // *J. Ind. Eng. Chem.* 2015. Vol. 26. P. 129.
217. Oladipo A.A., Ifebajo A.O., Gazi M. // *Appl. Catal. B Environ.* Vol. 243. P. 243.
218. Wu Y., Wang F., Megharaj M., Naidu R., Chen Z. // *Sep. Purif. Technol.* 2015. Vol. 154. P. 161.
219. Tang X., Li Z., Liu K., Luo X., He D., Ao M., Peng Q. // *Powder Technol.* 2020. Vol. 376. P. 42.
220. Liu Y., Liu X., Zhao Y., Dionysiou D.D. // *Appl. Catal. B Environ.* 2017. Vol. 213. P. 74.
221. Fernandes N.C., Brito L.B., Costa G.G., Taveira S.F., Cunha-Filho M.S.S., Oliveira G.A.R., Marreto R.N. // *Chem. Biol. Interact.* 2018. Vol. 291. P. 47.
222. Herney-Ramirez J., Silva A.M., Vicente M.A., Costa C.A., Madeira L.M. // *Appl. Catal. B Environ.* 2011. Vol. 101. N 3–4. P. 197.
223. Kumar V., Ghime D., Ghosh P. // *Chem. Eng. Commun.* 2020. Vol. 207. N 10. P. 1380.
224. Kumar V., Pandey N., Dharmadhikari S., Ghosh P. // *Water Environ. Res.* 2020. Vol. 92. N 2. P. 211.
225. Wang Q., Tian S., Ning P. // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2014. Vol. 53. N 2. P. 643.
226. Xu H.Y., Qi S.Y., Li Y., Zhao Y., Li J.W. // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2013. Vol. 20. N 8. P. 5764.

Информация об авторах

Исаев Абдулгалим Будаевич – зав. кафедрой неорганической химии и химической экологии химического факультета ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный университет», доцент, канд. хим. наук, abdul-77@yandex.ru

Магомедова Асият Германовна – аспирант кафедры неорганической химии и химической экологии химического факультета ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный университет», asiyat_magomedova1996@mail.ru

Вклад авторов

Исаев А.Б.: концептуализация, написание, редактирование;

Магомедова А.Г.: написание первоначального варианта, методология.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Дополнительная информация

Работа публикуется по материалам доклада на II Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Фундаментальные проблемы и прикладные аспекты химической науки и образования» (г. Махачкала, 10–11 декабря 2021 г.), посвященной 90-летию Дагестанского государственного университета и 75-летию доктора химических наук, профессора Ухумаали Гаджиевича Магомедбекова.

Статья поступила в редакцию 16.01.2022;
одобрена после рецензирования 22.01.2022;
принята к публикации 14.02.2021.