

ОКИСЛЕНИЕ СУПЕРТОКСИКАНТОВ В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОМ БАРЬЕРНОМ РАЗРЯДЕ В ПРИСУТСТВИИ ФЕРРАТОВ

Н.В. Клипов, Е.Ю. Квиткова, Т.В. Извекова, Г.И. Гусев,
Le Thi Mai Huong, Н.Е. Гордина, А.А. Гущин

Николай Вячеславович Клипов (ORCID 0000-0002-3583-3871), Елена Юрьевна Квиткова (ORCID 0000-0003-3366-9483), Татьяна Валерьевна Извекова (ORCID 0000-0002-3583-3876), Григорий Игоревич Гусев (ORCID 0000-0002-8528-3403), Наталья Евгеньевна Гордина (ORCID 0000-0002-1067-4688), Андрей Андреевич Гущин (ORCID 0000-0003-2655-1671)*

Кафедра Промышленной экологии, Ивановский государственный химико-технологический университет, пр. Шереметевский, 7, Иваново, Российская Федерация, 153000

E-mail: klipov-85@mail.ru, bur_1981@mail.ru, mbimpa@bk.ru, grisha.gusev.05@mail.ru, gordina@isuct.ru, gushchin@isuct.ru*

Le Thi Mai Huong (ORCID 0000-0002-5742-5750)

Вьетнамский институт атомной энергии, Ханой, Вьетнам

Проведено исследование процессов окисления при воздействии ферратов и совмещенного плазменного воздействия в присутствии ферратов на водные раствора фенола и 2,4-дихлорфенола (с начальной концентрацией органических соединений 1-100 мг/л). Синтез феррата, используемого в процессе очистки модельных растворов, осуществлялся химическим способом растворением $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ в щелочном растворе NaClO_4 с последующим нагреванием полученной смеси. Концентрация феррата в экспериментах была постоянной и составляла 0,1 г/л. Соотношение объемов в системах «обрабатываемый раствор – феррат» составляло 10:1. При воздействии ферратов на исследуемые растворы деструкция 2,4-дихлорфенола протекает более эффективно, чем в случае использования диэлектрического барьерного разряда (эффективность деструкции составляет 43% и 59% соответственно); для модельных растворов фенола эффективность деструкции была одинакова (не превышала 37%). Введение в разрядную зону плазмы феррата приводило к существенному увеличению эффективности деструкции исследуемых органических соединений (до 86% - для фенола и 92% - для 2,4-дихлорфенола). Показано, что деструкция органических соединений описывается уравнением 1-ого кинетического порядка, решение которого позволило оценить эффективные константы скорости и величины скоростей разложения фенола и 2,4-дихлорфенола. Механизм синергетического воздействия окисления органических соединений в системе «плазма-феррат» обусловлен взаимодействием следующих систем: 1) воздействие на водные растворы диэлектрического барьерного разряда, приводящее к образованию активных частиц; 2) протекание химических реакций между присутствующими в растворе FeO_2^{4-} и активными частицами плазмы; 3) реакции окислителей с органическими соединениями, к которым относятся прямое окисление ферратом (VI) (с окислительно-восстановительным потенциалом 2,20 В) и активными частицами, образовавшимися в комбинированном процессе.

Ключевые слова: очистка воды, деструкция, токсичные соединения, ферраты, диэлектрический барьерный разряд, активные частицы, комбинированное действие

Для цитирования:

Клипов Н.В., Квиткова Е.Ю., Извекова Т.В., Гусев Г.И., Le Thi Mai Huong, Гордина Н.Е., Гущин А.А. Окисление супертоксикантов в диэлектрическом барьерном разряде в присутствии ферратов. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2025. Т. 68. Вып. 9. С. 126–133. DOI: 10.6060/ivkkt.20256809.7273.

For citation:

Klipov N.V., Kvitkova E.Yu., Izvekova T.V., Gusev G.I., Le Thi Mai Huong, Gordina N.E., Gushchin A.A. Oxidation of supertoxicants in a dielectric barrier discharge in the presence of ferrates. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2025. V. 68. N 9. P. 126–133. DOI: 10.6060/ivkkt.20256809.7273.

OXIDATION OF SUPERTOXCANTS IN A DIELECTRIC BARRIER DISCHARGE IN THE PRESENCE OF FERRATES

N.V. Klipov, E.Yu. Kvitkova, T.V. Izvekova, G.I. Gusev,
Le Thi Mai Huong, N.E. Gordina, A.A. Gushchin

Nikolay V. Klipov (ORCID 0000-0002-3583-3871), Elena Yu. Kvitkova (ORCID 0000-0003-3366-9483), Tatyana V. Izvekova (ORCID 0000-0002-3583-3876), Grigory I. Gusev (ORCID 0000-0002-8528-3403), Natalia E. Gordina (ORCID 0000-0002-1067-4688), Andrey A. Gushchin (ORCID 0000-0003-2655-1671)*

Department of Industrial Ecology, Ivanovo State University of Chemical Technology, Sheremetevskiy ave., 7, Ivanovo, 153000 Russian Federation,

E-mail: klipov-85@mail.ru, bur_1981@mail.ru, mbimpa@bk.ru, grisha.gusev.05@mail.ru, gordina@isuct.ru, gushchin@isuct.ru*

Le Thi Mai Huong (Orcid 0000-0002-5742-5750)

Vietnam Institute of Atomic Energy, Hanoi, Vietnam

The oxidation processes under the action of ferrates and combined plasma action in the presence of ferrates on aqueous solutions of phenol and 2,4-dichlorophenol (with initial concentrations of organic compounds of 1-100 mg/l) were studied. The ferrate used in the process of cleaning model solutions was synthesized chemically by dissolving $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ in an alkaline solution of NaClO_4 , followed by heating the resulting mixture. The ferrate concentration in the experiments was constant and amounted to 0.1 g/l. The volume ratio in the "processed solution - ferrate" systems was 10:1. When ferrates acted on the studied solutions, the destruction of 2,4-dichlorophenol proceeds more efficiently than in the case of using a dielectric barrier discharge (the destruction efficiency is 43% and 59%, respectively). For model phenol solutions, the destruction efficiency was the same (no more than 37%). Introduction of ferrate into the discharge zone of plasma resulted in significant increase in the destruction efficiency of the organic compounds under study (up to 86% for phenol and 92% for 2,4-dichlorophenol). It was shown that destruction of organic compounds is described by a 1st order kinetic equation, solution of which allowed estimating effective rate constants and rates of phenol and 2,4-dichlorophenol decomposition. The mechanism of synergistic effect of organic compound oxidation in the plasma-ferrate system is due to interaction of the following systems: 1) effect of dielectric barrier discharge on aqueous solutions, resulting in formation of active particles; 2) chemical reactions between FeO_2^{4-} present in solution and active plasma particles; 3) reactions of oxidizing agents with organic compounds, which include direct oxidation with ferrate (VI) (with a redox potential of 2.20 V) and active particles formed in the combined process.

Keywords: water treatment, destruction, toxic compounds, ferrates, dielectric barrier discharge, active particles, combined action

ВВЕДЕНИЕ

С развитием научно-технического прогресса все больше растет нагрузка на окружающую природную среду. К одной из глобальных экологических проблем современности относят загрязнение поверхностных и подземных вод, обусловленное сбросом в природные водные объекты неочищенных или недостаточно очищенных хозяйственно-

бытовых, промышленных и ливневых сточных вод. К одним из приоритетных загрязнителей гидросферы относятся фенолы и их производные, которые широко используются практически во всех областях промышленности: в производстве лаков и красок, синтетических смол, пластификаторов, поверхностно-активных и дубильных веществ, ядохимикатов, стабилизаторов, антисептиков и др. Все это является причиной их высокого содержания в

окружающей среде по сравнению с другими распространенными классами приоритетных органических загрязняющих веществ. Наиболее опасными фенолами для окружающей среды и живых организмов являются их хлорсодержащие производные. Помимо высокой токсичности и устойчивости к естественным процессам разложения, основная опасность полихлорфенолов состоит в том, что при конденсации двух любых молекул полихлорфенолов возможно образование чрезвычайно токсичных ксенобиотиков – полихлорированных дибензо-*p*-диоксинов и дибензофуранов, предельно-допустимые концентрации (ПДК) которых в 10^5 - 10^6 раз меньше, чем исходных веществ [1, 2]. В настоящее время в мире ежегодно производится более 100000 т полихлорфенолов, из них легких полихлорфенолов (1-3 атома хлора) 60000 т и тяжелых (4-5 атомов хлора) – 35000-40000 т [3]. Главным источником поступления в окружающую среду хлорированных фенолов являются сточные воды различных видов промышленных предприятий, таких как предприятия переработки нефти и горючих сланцев, лакокрасочных и химико-фармацевтических производств и ряда других [1, 4]. Также источниками хлорпроизводных фенола могут быть следующие процессы: деструкция хлорорганических пестицидов, фунгицидов, гербицидов, хлорирование при очистке сточных вод и водоподготовке. Отметим, что при обеззараживании хлором водопроводной воды путем хлорирования предъявляются высокие требования к содержанию фенолов в исходной воде, так как хлорпроизводные имеют неприятный запах. Например, тетрахлорфенолы и пентахлорфенол имеют пороговую концентрацию по запаху равную 1000 мкг/дм³, трихлорфенолы – 100 мкг/дм³, но самая низкая величина у 2,4-дихлорфенола – 1 мкг/дм³ [1, 2].

В последнее время широкое распространение в процессах очистки воды от органических соединений получили АОР-технологии. К таким технологиям относятся Фентон-процессы, озонирование, фотокатализ, окисление с помощью ферратов и персульфатов [5-10].

Так использование ферратов может быть одним из возможных эффективных методов очистки сточных вод от трудноокисляемых органических соединений [11]. Окисление Fe (VI) признано «зеленой» технологией, позволяющей с высокой эффективностью окислять не только исходные высокотоксичные, персистентные загрязняющие вещества, но образующиеся в результате их разложения промежуточные соединения [12].

Эффективным способом очистки воды от органических токсикантов является применение

неравновесной плазмы [13-15]. Этот метод способен эффективно окислять органические соединения при низких энергетических затратах и отсутствии вторичного загрязнения окружающей среды [16]. Эти преимущества делают технологию особенно перспективной для практического применения, поэтому многие исследователи активно изучают различные типы разрядов с целью создания плазменных систем очистки воды.

Основным недостатком перечисленных АОР-методов является низкая степень минерализации исходных органических токсикантов [17]. Одним из способов, позволяющих избежать данного недостатка, является возможность комбинирования АОР-методов.

В работе приведены результаты исследования совместного воздействия диэлектрического барьерного разряда (ДБР) и ферратов на водные растворы 2,4-дихлорфенола (2,4-ДХФ) и фенола.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве основных загрязнителей использовались водные растворы 2,4-ДХФ и фенола с начальными концентрациями (C_0) в интервале – 1-100 мг/л и концентрацией феррата – 0,1 г/л. Получение феррата, используемого в процессе очистки модельных растворов, осуществляли химическим способом растворением $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ в щелочном растворе $NaClO_4$ с последующим нагреванием полученной смеси [18, 19].

Обработку водных растворов органических соединений проводили на установке, реализующей ДБР, с реактором планарного типа. Плазмохимический реактор (рис. 1) представлял собой стеклянный сосуд цилиндрической формы, внутренний диаметр которого составлял 60 мм. Дно ячейки располагалось на подставке 3, выполненной из политетрафторэтилена.

Толщина диэлектрического барьера между электродом из алюминиевой фольги ($\varnothing$ 60 мм, толщиной 20 мкм) и обрабатываемым раствором составляла 3 мм. Сосуд герметично закрывался крышкой, выполненной из политетрафторэтилена, в которой был вмонтирован электрод, изготовленный из алюминия ($\varnothing$ 30 мм). Для подачи и удаления плазмообразующего газа в крышку были также вмонтированы два стеклянных патрубка. Расход плазмообразующего газа (кислород) составлял 3 см³/с. Барьерный разряд возбуждался от высоковольтного трансформатора, величина приложенного к электродам напряжения составляла 10 кВ. Феррат добавлялся непосредственно в реактор перед возбуждением разряда. Время контакта раствора в зоне разряда (τ) изменялось в интервале 5-30 мин.

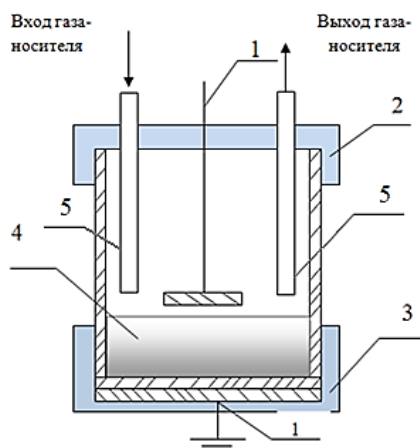


Рис. 1. Реактор с планарным расположением электродов: 1 – электроды; 2 – крышка; 3 – подставка; 4 – обрабатываемый раствор; 5 – стеклянные патрубки для подачи и удаления плазмообразующего газа

Fig. 1. Reactor with a planar arrangement of electrodes: 1 - electrodes; 2 - cover; 3 - stand; 4 - processed solution; 5 - glass pipes for supplying and removing plasma-forming gas

Концентрация 2,4-ДХФ определялась газохроматографическим методом [20] с использованием газового хроматографа «Хроматек 5000.2», оснащенного детектором по электронному захвату. Хроматографическая система была откалибрована с использованием образцов государственного стандарта (ГСО) исследуемого 2,4-ДХФ. Относительная погрешность определения 30% при доверительной вероятности 0,95.

Концентрация фенола в водных растворах определялась флуориметрическим методом на флуориметре «Флюорат 2-М» (Люмэкс, Россия) [21]. При доверительной вероятности 0,95 относительная погрешность измерений составляла 25%.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе экспериментов было исследовано три процесса окисления фенола и 2,4-ДХФ: 1) обработка растворов ферратом; 2) обработка растворов в ДБР; 3) совместное воздействие феррата и ДБР.

Результаты экспериментов (рис. 2) показывают, что эффективность деструкции зависит от времени обработки, так, с ростом времени обработки с 5 до 30 мин для 2,4-ДХФ эффективность увеличивается в 1,2 раза. Максимальная степень очистки при максимальных временах обработки составляла 57% для фенола, и 82% – для 2,4-ДХФ.

Как видно из рис. 2, как и в случае обработки ферратами, в ДБР 2,4-ДХФ разлагается более эффективно по сравнению с фенолом. Так при временах обработки модельного раствора, равных 15 мин, степень деструкции 2,4-ДХФ в 1,3 раза выше, чем фенола.

Кинетические закономерности деструкции 2,4-ДХФ в ДБР с внесением в объем раствора феррата показаны на рис. 3. Введение в раствор окислителя приводит к росту эффективности процесса деструкции в 1,3 раза, а скорость разложения 2,4-ДХФ увеличивается более чем в 10 раз.

Отметим, что максимальная степень очистки достигалась при максимальных временах обработки и составляла 86,2% для фенола, и 92% – для 2,4-ДХФ.

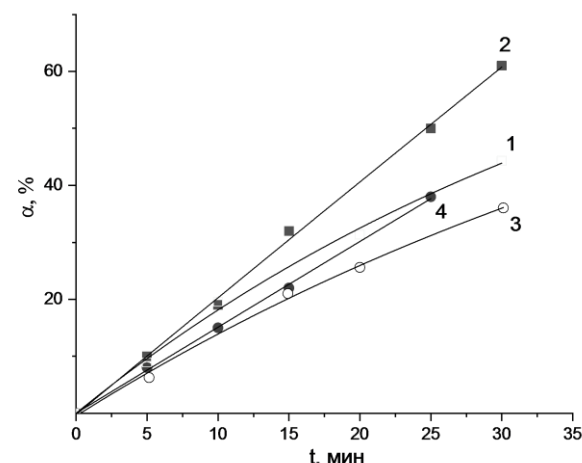


Рис. 2. Эффективность деструкции органических соединений при индивидуальном воздействии: ДБР на модельные растворы фенола (1, 3) и ферратов на модельные растворы 2,4-ДХФ (2, 4). Условия обработки: концентрация органических соединений в растворе – 0,266 ммоль/л; концентрация феррата в растворе 0,1 г/л; напряжение, приложенное к электродам – 10 кВ
Fig. 2. Efficiency of organic compound destruction under individual impact: DBD on model solutions of phenol (1, 3) and ferrates on model solutions of 2,4-DHF (2, 4). Processing conditions: concentration of organic compounds in solution – 0.266 mmol/l; concentration of ferrate in solution 0.1 g/l; voltage applied to electrodes – 10 kV

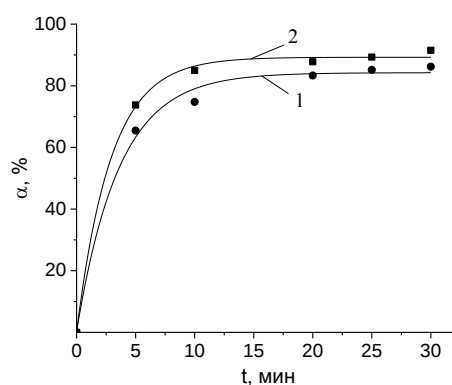


Рис. 3. Эффективность деструкции фенола (1) и 2,4-ДХФ (2) в совмещенном процессе (ДБР + феррат). Условия обработки: концентрация органических соединений в растворе – 0,266 ммоль/л; концентрация феррата в растворе 0,1 г/л; напряжение, вводимое в разряд – 10 кВ).

Fig. 3. Efficiency of phenol (1) and 2,4-DCP (2) destruction in a combined process (DBD + ferrate). Processing conditions: concentration of organic compounds in solution – 0.266 mmol/l; concentration of ferrate in solution 0.1 g/l; voltage input into discharge – 10 kV)

Кинетические закономерности деструкции всех исследуемых систем приведены на рис. 4. Кинетические кривые обрабатывались выражением (1):

$$C = C_0 \cdot \exp(-K \cdot \tau_k), \quad (1)$$

которое хорошо описывает полученные экспериментальные данные ($R \approx 0,99$). Обработка кинетических кривых деструкции водных растворов органических соединений позволяет оценить скорость их разложения (V) при $t \rightarrow 0$. Результаты расчетов приведены в таблице.

Сравнение эффективности индивидуальных и совмещенных процессов представлено на рис. 5. Полученные данные показывают, что процесс обработки водных растворов 2,4-ДХФ ферратом более эффективен, чем обработка в ДБР – максимальная степень окисления составила, соответственно, 59% и 43%. При обработке растворов фенола ферратом или в ДБР эффективность деструкции была одинакова и составила примерно 37%. Однако при совмещенном воздействии процесс окисления исследуемых соединений протекает существенно эффективней. Максимальная степень деструкции достигает 86% для фенола и 92% – для

2,4-ДХФ, что указывает на синергетическое взаимодействие двух окислительных процессов.

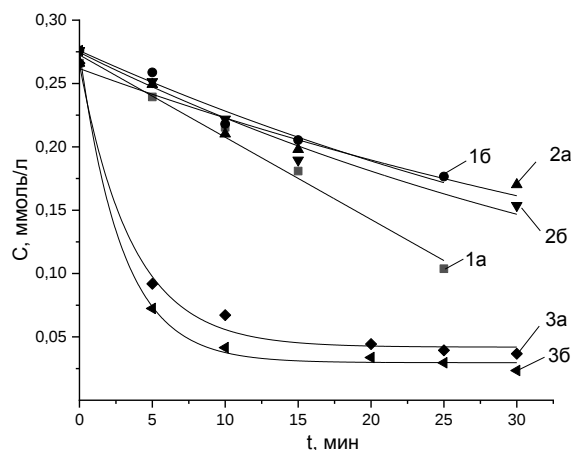


Рис. 4. Кинетика деструкции фенола (а) и 2,4-ДХФ (б) в исследуемых процессах: 1) феррат; 2) ДБР; 3) ДБР + феррат. Условия обработки: концентрация органических соединений в растворе – 0,27 ммоль/л; концентрация феррата в растворе 0,1 г/л; напряжение, вкладываемое в разряд – 10 кВ)
Fig. 4. Kinetics of phenol (a) and 2,4-DCP (b) destruction in the studied processes: 1) ferrate; 2) DBD; 3) DBD + ferrate. Processing conditions: concentration of organic compounds in solution – 0.27 mmol/l; concentration of ferrate in solution 0.1 g/l; voltage input into the discharge – 10 kV)

Таблица

Кинетические параметры исследуемых процессов
Table. Kinetic parameters of the processes under study

Метод обработки	Феррат		ДБР		ДБР + феррат	
Соединение	Фенол	2,4-ДХФ	Фенол	2,4-ДХФ	Фенол	2,4-ДХФ
K , мин	0,0324	0,019	0,0161	0,0209	0,1393	0,2286
V , ммоль/л·мин	0,008618	0,005244	0,004283	0,005768	0,037054	0,063094

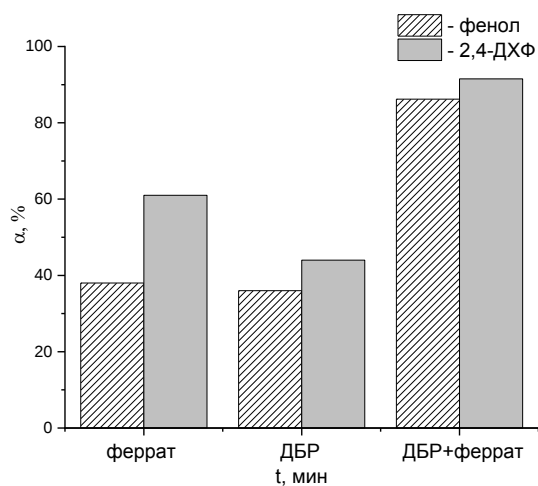
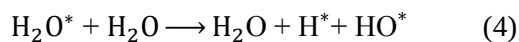
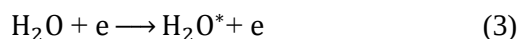
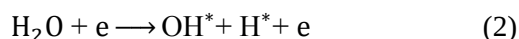


Рис. 5. Эффективность окисления фенола и 2,4-ДХФ
Fig. 5. Oxidation efficiency of phenol and 2,4-DCP

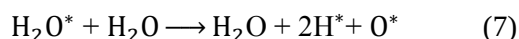
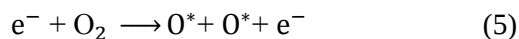
Таким образом, механизм синергетического эффекта в процессе сочетания феррата (VI) и ДБР протекает за счет взаимодействия следующих систем:

1) в процессе горения разряда протекает серия сложных реакций, приводящая к образованию активных частиц, среди которых основными являются гидроксильный радикал (реакции 2-4), атомарный кислород (реакции 5-7) и озон (реакции 8-11) [22, 23]:

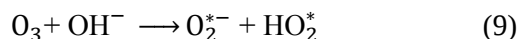
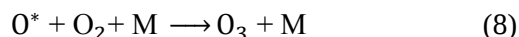
Гидроксильный радикал.

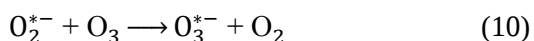


Атомарный кислород.

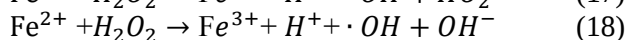
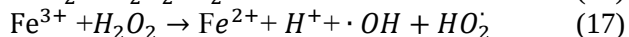
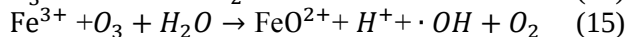
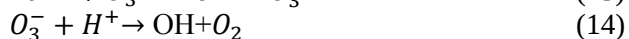
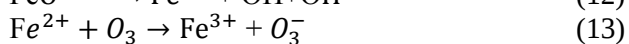


Озон





2) протекание химических реакций между присутствующими в растворе FeO_2^{4-} и образующимися в разряде активными частицами (в первую очередь O_3 и радикалами OH , OH_2 и $\text{O}_2^{\cdot}$) [24]. Известно, что такие формы Fe, как Fe^{2+} , Fe^{3+} , $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ и $\text{FeO}(\text{OH})$, способны оказывать каталитическое воздействие на озон с образованием гидроксид-радикалов, например, (реакции 12-18):



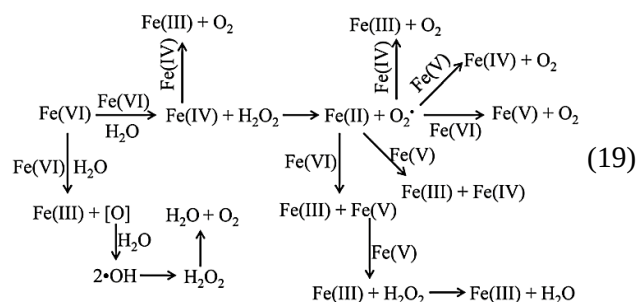
что, безусловно, способствует реакциям окисления фенола и 2,4-ДХФ, а также их продуктов деструкции [25].

Также продукты восстановления феррата (VI) $\text{Fe}(\text{III})$ или $\text{Fe}(\text{II})$ могут быть окислены $\text{O}_2^{\cdot}$ до $\text{Fe}(\text{V})$, который может участвовать в процессе разложения органических соединений. Таким образом, в совмещенном процессе это приводит к существенному увеличению эффективности процессов окисления.

Конечными продуктами реакций с ферратами (VI) в водных растворах являются соединения железа различной валентности (такие как $\text{Fe}(\text{V})$, $\text{Fe}(\text{IV})$), $\text{Fe}(\text{III})$, $\text{Fe}(\text{II})$), а также молекулярный и атомарный кислород (реакции 19). Последний в свою очередь приводит к образованию OH радикалов [26].

3) реакции окислителей с органическими соединениями, к которым относятся прямое окисление ферратом (VI) (окислительно-восстановительный потенциал 2,20 В) и реакции за счет образовавшихся активных частиц, количество которых в комбинированном процессе, существенно выше,

чем при реализации индивидуальных процессов, что и приводит к увеличению деструкции.



ВЫВОДЫ

В работе приведены результаты исследования процесса деструкции фенола и 2,4-ДХФ в результате комбинированного воздействия ДБР и феррата (VI). Показано, что совмещенный процесс является более эффективным по сравнению индивидуальными методами окисления органических соединений. Установлено, что максимальная эффективность удаления фенолов при комбинированном воздействии достигает 92%, что в 2 раза выше, чем при окислении ферратом и в 3 раза выше, чем при воздействии ДБР. Возможный химизм процесса позволяет сделать вывод, что синергетический эффект ДБР и феррата (VI) обусловлен взаимодействием активных частиц, образующихся непосредственно при воздействии плазмы и феррата на раствор, а также за счет протекания реакций между ферратом и образующимися в разряде активными частицами.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России, соглашение № 075-15-2024-481.

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

The work was carried out with the support of the Ministry of Education and Science of Russia, agreement No. 075-15-2024-481.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Environmental Impacts. Volume III: Compendium of Environmental. German Federal Ministry for Economic Cooperation and Development (BMZ) (дата обращения: 10.05.2025) <https://wgbis.ces.iisc.ac.in/energy/HC270799/HDL/ENV/Erg-Default.html>.
2. **Olaniran A.O., Igbinsola E.O.** Chlorophenols and other related derivatives of environmental concern: properties, distribution and microbial degradation processes. *Chemosphere*. 2011. V. 83. N 10. P. 1297–1306. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2011.04.009.

REFERENCES

1. Environmental Impacts. Volume III: Compendium of Environmental. German Federal Ministry for Economic Cooperation and Development (BMZ) (access date: 10.05.2025) <https://wgbis.ces.iisc.ac.in/energy/HC270799/HDL/ENV/Erg-Default.html>.
2. **Olaniran A.O., Igbinsola E.O.** Chlorophenols and other related derivatives of environmental concern: properties, distribution and microbial degradation processes. *Chemosphere*. 2011. V. 83. N 10. P. 1297–1306. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2011.04.009.

3. **Wei Y., Zhu J.** Para-Dichlorobenzene Exposure Is Associated with Thyroid Dysfunction in US Adolescents. *J. Pediatr.* 2016. V. 177. P. 238–243. DOI: 10.1016/j.jpeds.2016.06.085.
4. **Michalowicz J., Wluka A., Cyrkler M., Maćczak A., Sicińska P., Mokra K.** Phenol and chlorinated phenols exhibit different apoptotic potential in human red blood cells (in vitro study). *Environ. Toxicol. Pharmacol.* 2018. N 61. P. 95–101. DOI: 10.1016/j.etap.2018.05.014.
5. **Pandis P.K., Kalogirou C., Kanellou E., Vaitis C., Savvidou M.G., Sourkouni G., Argiris C.** Key points of advanced oxidation processes (AOPs) for wastewater, organic pollutants and pharmaceutical waste treatment: A mini review. *Chem. Eng.* 2022. V. 6. N 1. P. 8. DOI: 10.3390/chemengineering6010008.
6. **Zhang M., Dong H., Zhao L., Wang D.X., Meng D.** A review on Fenton process for organic wastewater treatment based on optimization perspective. *Sci. Total Environ.* 2019. V. 670. P. 110–121. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.03.180.
7. **Zhang K., Xie Y., Niu L., Huang X., Yu X., Feng M.** Fe(IV)/Fe(V)-mediated polyferric sulfate/periodate system: A novel coagulant/oxidant strategy in promoting micropollutant abatement. *J. Hazard. Mater.* 2024. V. 466. P. 133614. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2024.133614.
8. **Karim A.V., Krishnan S., Pisharody L., Malhotra M., Bustillo-Lecompte C.** Application of ferrate for advanced water and wastewater treatment. *Adv. Oxidat. Proc. Appl. Trends, and Prosp. IntechOpen.* 2020. DOI: 10.5772/intechopen.90231.
9. **Yu J., Sumita, Zhang K., Zhu Q., Wu C., Huang S., Pang W.** A review of research progress in the preparation and application of ferrate (VI). *Water.* 2023. V. 15. N 4. P. 699. DOI: 10.3390/w15040699.
10. **Zhou Z., Liu X., Sun K., Lin C., Ma J., He M., Ouyang W.** Persulfate-based advanced oxidation processes (AOPs) for organic-contaminated soil remediation: A review. *Chem. Eng. J.* 2019. V. 372. P. 836–851. DOI: 10.1016/j.cej.2019.04.213.
11. **Sharma V.K., Zboril R., Varma R.S.** Ferrates: greener oxidants with multimodal action in water treatment technologies. *Acc. Chem. Res.* 2015. V. 48. N 2. P. 182–191. DOI: 10.1021/ar5004219.
12. **Dar A.A., Pan B., Qin J., Zhu Q., Lichtfouse E., Usman M., Wang C.** Sustainable ferrate oxidation: Reaction chemistry, mechanisms and removal of pollutants in wastewater. *Environ. Pollut.* 2021. V. 290. P. 117957. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.117957.
13. **Гущин А.А., Гриневич В.И., Квиткова Е.Ю., Гусев Г. И., Шутов Д.А., Иванов А.Н., Манукян А.С., Рыбкин В.В.** Газовые разряды как инструмент очистки газовых и растворных сред и синтеза неорганических материалов. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2023. Т. 66. Вып. 7. С. 120–131. DOI: 10.6060/ivkkt.20236607.6835j.
14. **Gushchin A.A., Grinevich V.I., Shulyk V.Y., Kvitkova E.Y., Rybkin V.V.** Destruction Kinetics of 2,4 Dichlorophenol Aqueous Solutions in an Atmospheric Pressure Dielectric Barrier Discharge in Oxygen. *Plasma Chem. Plasma Proc.* 2018. V. 38. P. 123–134. DOI: 10.1007/s11090-017-9857-z.
15. **Игнатьев А.А., Гущин А.А., Шутов Д.А., Иванов А.Н., Манукян А.С., Иванова П.А., Рыбкин В.В.** Кинетика разложения парацетамола в водном растворе под действием разряда постоянного тока атмосферного давления в воздухе. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2023. Т. 66. Вып. 8. С. 135–140. DOI: 10.6060/ivkkt.20236608.6890.
16. **Titov E.Yu., Bodrikov I.V., Titov D.Yu.** Control of the Energy Impact of Electric Discharges in a Liquid Phase. *Energies.* 2023. V. 16. N 4. P. 1683. DOI: 10.3390/en16041683.
3. **Wei Y., Zhu J.** Para-Dichlorobenzene Exposure Is Associated with Thyroid Dysfunction in US Adolescents. *J. Pediatr.* 2016. V. 177. P. 238–243. DOI: 10.1016/j.jpeds.2016.06.085.
4. **Michalowicz J., Wluka A., Cyrkler M., Maćczak A., Sicińska P., Mokra K.** Phenol and chlorinated phenols exhibit different apoptotic potential in human red blood cells (in vitro study). *Environ. Toxicol. Pharmacol.* 2018. N 61. P. 95–101. DOI: 10.1016/j.etap.2018.05.014.
5. **Pandis P.K., Kalogirou C., Kanellou E., Vaitis C., Savvidou M.G., Sourkouni G., Argiris C.** Key points of advanced oxidation processes (AOPs) for wastewater, organic pollutants and pharmaceutical waste treatment: A mini review. *Chem. Eng.* 2022. V. 6. N 1. P. 8. DOI: 10.3390/chemengineering6010008.
6. **Zhang M., Dong H., Zhao L., Wang D.X., Meng D.** A review on Fenton process for organic wastewater treatment based on optimization perspective. *Sci. Total Environ.* 2019. V. 670. P. 110–121. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.03.180.
7. **Zhang K., Xie Y., Niu L., Huang X., Yu X., Feng M.** Fe(IV)/Fe(V)-mediated polyferric sulfate/periodate system: A novel coagulant/oxidant strategy in promoting micropollutant abatement. *J. Hazard. Mater.* 2024. V. 466. P. 133614. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2024.133614.
8. **Karim A.V., Krishnan S., Pisharody L., Malhotra M., Bustillo-Lecompte C.** Application of ferrate for advanced water and wastewater treatment. *Adv. Oxidat. Proc. Appl. Trends, and Prosp. IntechOpen.* 2020. DOI: 10.5772/intechopen.90231.
9. **Yu J., Sumita, Zhang K., Zhu Q., Wu C., Huang S., Pang W.** A review of research progress in the preparation and application of ferrate (VI). *Water.* 2023. V. 15. N 4. P. 699. DOI: 10.3390/w15040699.
10. **Zhou Z., Liu X., Sun K., Lin C., Ma J., He M., Ouyang W.** Persulfate-based advanced oxidation processes (AOPs) for organic-contaminated soil remediation: A review. *Chem. Eng. J.* 2019. V. 372. P. 836–851. DOI: 10.1016/j.cej.2019.04.213.
11. **Sharma V.K., Zboril R., Varma R.S.** Ferrates: greener oxidants with multimodal action in water treatment technologies. *Acc. Chem. Res.* 2015. V. 48. N 2. P. 182–191. DOI: 10.1021/ar5004219.
12. **Dar A.A., Pan B., Qin J., Zhu Q., Lichtfouse E., Usman M., Wang C.** Sustainable ferrate oxidation: Reaction chemistry, mechanisms and removal of pollutants in wastewater. *Environ. Pollut.* 2021. V. 290. P. 117957. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.117957.
13. **Gushchin A.A., Grinevich V.I., Kvitkova E.Y., Gusev G.I., Shutov D.A., Ivanov A.N., Rybkin V.V.** A Gas discharges as a tool for cleaning gas and solution mediums and synthesis of inorganic materials. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2023. V. 66. N 7. P. 120–131 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20236607.6835j.
14. **Gushchin A.A., Grinevich V.I., Shulyk V.Y., Kvitkova E.Y., Rybkin V.V.** Destruction Kinetics of 2,4 Dichlorophenol Aqueous Solutions in an Atmospheric Pressure Dielectric Barrier Discharge in Oxygen. *Plasma Chem. Plasma Proc.* 2018. V. 38. P. 123–134. DOI: 10.1007/s11090-017-9857-z.
15. **Ignatiev A.A., Gushchin A.A., Shutov D.A., Ivanov A.N., Manukyan A.S., Ivanova P.A., Rybkin V.V.** Kinetics of decomposition of paracetamol in aqueous solution under the action of a DC discharge at atmospheric pressure in air. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2023. V. 66. N 8. P. 135–140 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20236608.6890.
16. **Titov E.Yu., Bodrikov I.V., Titov D.Yu.** Control of the Energy Impact of Electric Discharges in a Liquid Phase. *Energies.* 2023. V. 16. N 4. P. 1683. DOI: 10.3390/en16041683.

17. Shang K., Morent R., Wang N., Wang Y., Peng B., Jiang N., Li J. Degradation of sulfamethoxazole (SMX) by water falling film DBD Plasma/Persulfate: Reactive species identification and their role in SMX degradation. *Chem. Eng. J.* 2022. V. 431. P. 133916. DOI: 10.1016/j.cej.2021.133916.
18. Jiang J.Q., Lloyd B., Grigore L. Preparation and evaluation of potassium ferrate as an oxidant and coagulant for potable water treatment. *Environ. Eng. Sci.* 2001. V. 18. N 5. P. 323-328. DOI: 10.1089/1092875015272604.
19. El Maghraoui A., Zerouale A., Ijjaali M., Mohamed S. Synthesis and characterization of ferrate (VI) alkali metal by wet method. *Int. J. Modern Eng. Res. (IJMER)*. 2012. V. 2. N 6. P. 4521-4523.
20. ГОСТ Р 31858-2012 Вода питьевая. Метод определения содержания хлорорганических пестицидов газожидкостной хроматографией. М.: Стандартинформ. 2019 (Приказ ФАТР и М от 29.11.2012 № 1620-ст «Гарант» дата обращения: 14.05.2025). <https://base.garant.ru/5921859/>
21. ПНД Ф 14.1:2:4.182-02 Количественный химический анализ вод. Методика измерений массовых концентраций фенолов (общих и летучих) в пробах природных, питьевых и сточных вод флуориметрическим методом на анализаторе жидкости "Флюорат-02". Москва: ФГУ «Центр экологического контроля и анализа». 2002. 29 с.
22. Bobkova E., Khodor Y., Kornilova O., Rybkin V. Chemical composition of plasma of dielectric barrier discharge at atmospheric pressure with a liquid electrode. *High Temp.* 2014. V. 52. N 4. P. 511-517. DOI: 10.1134/S0018151X14030055.
23. Eliasson B., Hirth M., Kogelschatz U. Ozone synthesis from oxygen in dielectric barrier discharges. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 1987. V. 20. N 11. P. 1421. DOI: 10.1088/0022-3727/20/11/010.
24. Zhang T., Lu J., Ma J., Qiang Z. Comparative study of ozonation and synthetic goethite-catalyzed ozonation of individual NOM fractions isolated and fractionated from a filtered river water. *Water Res.* 2008. V. 42. N 6-7. P. 1563-1570. DOI: 10.1016/j.watres.2007.11.005.
25. Løgager T., Holcman J., Sehested K., Pedersen T. Oxidation of ferrous ions by ozone in acidic solutions. *Inorganic Chem.* 1992. V. 31. N 17. P. 3523-3529. DOI: 10.1021/ic00043a009.
26. Han Q., Dong W., Wang H., Ma H., Gu Y., Tian Y. Degradation of tetrabromobisphenol A by a ferrate(VI)-ozone combination process: advantages, optimization, and mechanistic analysis. *RSC Adv.* 2019. V. 9. N 71. P. 41783-41793. DOI: 10.1039/C9RA07774J.
17. Shang K., Morent R., Wang N., Wang Y., Peng B., Jiang N., Li J. Degradation of sulfamethoxazole (SMX) by water falling film DBD Plasma/Persulfate: Reactive species identification and their role in SMX degradation. *Chem. Eng. J.* 2022. V. 431. P. 133916. DOI: 10.1016/j.cej.2021.133916.
18. Jiang J.Q., Lloyd B., Grigore L. Preparation and evaluation of potassium ferrate as an oxidant and coagulant for potable water treatment. *Environ. Eng. Sci.* 2001. V. 18. N 5. P. 323-328. DOI: 10.1089/1092875015272604.
19. El Maghraoui A., Zerouale A., Ijjaali M., Mohamed S. Synthesis and characterization of ferrate (VI) alkali metal by wet method. *Int. J. Modern Eng. Res. (IJMER)*. 2012. V. 2. N 6. P. 4521-4523.
20. GOST R 31858-2012 Drinking water. Method for determination of organochlorine pesticides by gas-liquid chromatography. Moscow: Standartinform. 2019 (Order of FATR and M of 11.29.2012 № 1620-st «Garant» date of access: 14.05.2025) (in Russian). <https://base.garant.ru/5921859/>
21. PND F 14.1:2:4.182-02. Quantitative chemical analysis of water. Methodology for measuring mass concentrations of phenols (total and volatile) in samples of natural, drinking and waste water using the fluorimetric method on the Fluorat-02 liquid analyzer. Moscow: Federal State Institution «Center for Environmental Monitoring and Analysis». 2002. 29 p. (in Russian).
22. Bobkova E., Khodor Y., Kornilova O., Rybkin V. Chemical composition of plasma of dielectric barrier discharge at atmospheric pressure with a liquid electrode. *High Temp.* 2014. V. 52. N 4. P. 511-517. DOI: 10.1134/S0018151X14030055.
23. Eliasson B., Hirth M., Kogelschatz U. Ozone synthesis from oxygen in dielectric barrier discharges. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 1987. V. 20. N 11. P. 1421. DOI: 10.1088/0022-3727/20/11/010.
24. Zhang T., Lu J., Ma J., Qiang Z. Comparative study of ozonation and synthetic goethite-catalyzed ozonation of individual NOM fractions isolated and fractionated from a filtered river water. *Water Res.* 2008. V. 42. N 6-7. P. 1563-1570. DOI: 10.1016/j.watres.2007.11.005.
25. Løgager T., Holcman J., Sehested K., Pedersen T. Oxidation of ferrous ions by ozone in acidic solutions. *Inorganic Chem.* 1992. V. 31. N 17. P. 3523-3529. DOI: 10.1021/ic00043a009.
26. Han Q., Dong W., Wang H., Ma H., Gu Y., Tian Y. Degradation of tetrabromobisphenol A by a ferrate(VI)-ozone combination process: advantages, optimization, and mechanistic analysis. *RSC Adv.* 2019. V. 9. N 71. P. 41783-41793. DOI: 10.1039/C9RA07774J.

Поступила в редакцию 16.05.2025

Принята к опубликованию 26.05.2025

Received 09.01.2025

Accepted 27.01.2025