

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
РОССИЙСКИЙ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

УСПЕХИ
В ХИМИИ И ХИМИЧЕСКОЙ
ТЕХНОЛОГИИ

Том XXXIV

№ 12

Москва
2020

УДК 66.01-52
ББК 24. 35
У78

Рецензент:
Российский химико-технологический университет
имени Д. И. Менделеева

Успехи в химии и химической технологии: сб. науч. тр. Том XXXIV,
У78 № 12 (235). – М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2020. – 66 с.

В сборнике "Успехи в химии и химической технологии" опубликованы статьи по актуальным вопросам в области химической технологии новых материалов в рамках МКХТ-2020.

Материалы сборника представлены для широкого обсуждения на Международном семинаре «Новые материалы и химические технологии».

Сборник находится в открытом доступе, научные статьи включены в систему Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) на платформе Elibrary.ru.

Сборник представляет интерес для научно-технических работников, преподавателей, аспирантов и студентов химико-технологических вузов.

УДК 66.01-52
ББК 24. 35

Содержание

Абдрахманов А.Р., Щербакова Е.А., Богатов Н.А., Савина А.С. ВЛИЯНИЕ НИЗКОЧАСТОТНОГО АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА СКОРОСТЬ ДЕКОЛОРИЗАЦИИ МЕТИЛЕНОВОГО СИНЕГО ТИОСУЛЬФАТОМ НАТРИЯ	6
Щербакова Е.А., Богатов Н.А., Савина А.С., Абдрахманов А.Р. ВЛИЯНИЕ РАСТВОРЕННОГО КИСЛОРОДА НА ОКИСЛИТЕЛЬНО- ВОССТАНОВИТЕЛЬНУЮ РЕАКЦИЮ МЕТИЛЕНОВОГО СИНЕГО С АСКОРБИНОВОЙ КИСЛОТОЙ.....	9
Богатов Н.А., Савина А.С., Зоткин А.П., Халаджан Е.А. ВЛИЯНИЕ НИЗКОЧАСТОТНЫХ АКСИАЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ НА БИОХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЙОДИНОЛ.....	12
Онисифору П., Ахмедова Л.С., Седрик Д.Л.И., Касаткин Е.М., Чередниченко А.Г. ИССЛЕДОВАНИЕ АДСОРБЦИИ ПАРОВ ИЗОПРОПИЛОВОГО СПИРТА АКТИВИРОВАННЫМ УГЛЕМ	15
Муштаков А.Г., Савченко А.С., Супина А.Д., Костылева А.И., Маркова Е.Б. МЕТАЛЛООРГАНИЧЕСКИЕ КАРКАСНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ С Gd-ИОНАМИ ДЛЯ ПРОЦЕССОВ ХРАНЕНИЯ МЕТАН.....	18
Ковтун С.О., Индриксон Н.В., Затыкина А.Д., Маркова Е.Б., Чередниченко А.Г. ВЛИЯНИЕ МЕТОДА СИНТЕЗА НА ФОРМИРОВАНИЕ КАТАЛИТИЧЕСКИХ ЦЕНТРОВ Gd₂Zr₂O₇.....	21
Кабанов М.А., Иванцова Н.А., Коваль К.А., Балакина Е.С. ФОТООКИСЛИТЕЛЬНЫЕ МЕТОДЫ В ОЧИСТКЕ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ. ОБЗОР.....	24
Кузин Е.Н., Носова Т.И., Любушкин Т.Г., Чернышев П.И. ТИТАНСОДЕРЖАЩИЕ КОАГУЛЯНТЫ В ПРОЦЕССАХ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА	28
Зайцева А. Д., Гавва М. А., Азопков С.В., Кузин Е. Н. КОАГУЛЯЦИОННАЯ ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД ПРОИЗВОДСТВ ЧАЯ И АРОМАТИЧЕСКИХ ДОБАВОК	31
Сулова Е.Н., Худеев И.И., Лебедев А.Е., Меньшутина Н.В. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ НОВЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЛЮМИНОФОРНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ АЭРОГЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ.....	34
Пилюян А.Р., Абрамов А.А., Цыганков П.Ю., Меньшутина Н.В. ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ ГЕЛЕВЫХ СТРУКТУР, ПОЛУЧЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ 3D-ПЕЧАТИ	37
Сулова Е.Н., Ловская Д.Д., Лебедев А.Е., Меньшутина Н.В. СОВМЕЩЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ЗАМЕНЫ РАСТВОРИТЕЛЯ И СВЕРХКРИТИЧЕСКОЙ СУШКИ В ОДНОМ АППАРАТЕ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ АЭРОГЕЛЕЙ.....	40

Трапезников А.Н., Шайхатдинов Ф.А., Хохонов А.А., Агарков Д.А., Бредихин С.И., Чичиров А.А., Абаева Е.

ОБЗОР ХАРАКТЕРИСТИК ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, ИЗГОТАВЛИВАЕМЫХ И ПРИМЕНЯЕМЫХ НА АВТОМОБИЛЬНОМ ТРАНСПОРТЕ В РОССИИ.....43

Хохонов А.А., Шайхатдинов Ф.А., Бобровский В.А., Агарков Д.А., Бредихин С.И., Чичиров А.А., Рыбина Е.О.

ТЕХНОЛОГИИ ХРАНЕНИЯ ВОДОРОДА. ВОДОРОДНЫЕ НАКОПИТЕЛИ ЭНЕРГИИ47

Шафиев Д.Р., Трапезников А.Н., Хохонов А.А., Агарков Д.А., Бредихин С.И., Чичиров А.А., Субчева Е.Н.

МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ВОДОРОДА В ПРОМЫШЛЕННОМ МАСШТАБЕ. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ53

Бобровский В.А., Шафиев Д.Р., Трапезников А.Н., Агарков Д.А., Бредихин С.И., Чичиров А.А., Аверина Ю.М.

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ СПОСОБОВ ХРАНЕНИЯ И ТРАНСПОРТИРОВКИ ВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА ДЛЯ ГРУЗОВОГО ТРАНСПОРТА58

Силенок А. Р., Ветрова О. Б.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ТЕКУЩИЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ЦЕМЕНТНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ РОССИИ61

УДК 542.943-92

Кабанов М.А., Иванцова Н.А., Коваль К.А., Балакина Е.С.

ФОТООКИСЛИТЕЛЬНЫЕ МЕТОДЫ В ОЧИСТКЕ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ. ОБЗОР

Кабанов Максим Андреевич - студент 3 курса кафедры биотехнологии,
Иванцова Наталья Андреевна - к.х.н., доцент кафедры промышленной экологии
Коваль Кирилл Андреевич - студент 4 курса кафедры промышленной экологии
Балакина Екатерина Сергеевна - студент 4 курса кафедры биотехнологии
Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия, 125480, Москва, ул. Героев Панфиловцев, д. 20

Аннотация: Проведен аналитический обзор и сравнительная оценка применения усовершенствованных окислительных методов в процессах деструкции фенола и формальдегида в водных растворах. Определено, что если влияние связывания органических молекул с диоксидом титана очевидно в связи с известным механизмом гетерогенного фотокатализа, то влияние комплексообразования на окислительно-восстановительные свойства железа и окисляемого субстрата еще до конца не изучены.

Ключевые слова: фотоокисление, Фентон-процесс, органические соединения, хелатирование (комплексообразование).

PHOTO-OXIDATIVE METHODS IN THE PURIFICATION OF ORGANIC COMPOUNDS. REVIEW.

Kabanov M. A., Ivantsova N. A., Koval K. A., Balakina E. S.
D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia

Abstract: An analytical review and a comparative evaluation of the use of improved oxidative methods in the destruction of phenol and formaldehyde in aqueous solutions were carried out. It was determined that while the effect of binding organic molecules to titanium dioxide is obvious due to the known mechanism of heterogeneous photocatalysis, the effect of complexation on the redox properties of iron and the oxidized substrate has not yet been fully revealed

Key words: photooxidation, Fenton process, organic compound, chelation (complexation).

Передовые окислительные процессы (Advanced oxugen processes - AOPs), такие как фотолиз, фотокатализ, озонирование, процесс Фентона, анодное окисление, сонолиз и окисление влажным воздухом, широко применяются для удаления широкого спектра микропримесей органических загрязняющих веществ. Отдельные типы AOPs не могут обеспечить полное удаление широкого круга органических соединений из сточных вод. При совместном использовании AOPs наблюдается синергетический эффект, который позволяет производить больше гидроксильных радикалов, увеличивая тем самым степень деструкции органических соединений [1]. В представленном аналитическом обзоре будут рассмотрены отдельные AOPs и их ограничения в отношении деструкции органических соединений, содержащих различные функциональные группы. Применяемые в настоящее время AOPs подразделяются на: AOPs на основе УФ-излучения; AOPs на основе озонирования; AOPs на основе процесса Фентона; AOPs на основе электрохимических процессов; AOPs на основе сонолиза (использование ультразвука); AOPs на основе кавитации.

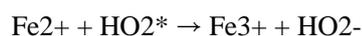
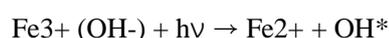
В соответствующих условиях, комбинированные AOPs-процессы не только инициируют ускоренную деструкцию, но и могут также привести к полной минерализации органического соединения. Множество факторов могут оказывать влияние на

эффективность интегрированных AOPs-процессов. Химические и физические свойства воды, молекулярная структура ОС, присутствие примесных ионов, вот лишь краткий перечень условий, оказывающий влияние на процесс деструкции. Так, одновременное присутствие в воде органических ионов (например, гуминовых или фульвокислот) и неорганических ионов (Cl⁻, NO₃⁻, CO₃²⁻) может приводить к образованию окислительных радикалов с высоким окислительно-восстановительным потенциалом – SO₄^{*-}; OH^{*}; Cl^{*} и другие [2-6]. Образование радикалов, в свою очередь, дополнительно увеличивает скорость реакции окисления или, наоборот, выступает в качестве поглотителей радикалов и существенно снижает эффективность деструкции органического соединения. [1, 7].

С другой стороны, фотореакции нашли широкое применение в органическом синтезе, а некоторые фотохимические процессы происходят постоянно в живых системах (процесс фотосинтез). В работах, например [8, 9], фотоокисление с помощью диоксида титана рассматривается как альтернатива другим химическим реакциям при обработке биополимеров. Именно поэтому исследование факторов, оказывающих влияние на протекание реакции окисления, может иметь решающее значение при выборе условий процесса фото- и сонокатализа [10-14].

Наиболее наглядно AOPs можно рассмотреть на примере простых органических соединений. Так, например, в работах [15-17] были исследованы кинетика процесса фотоокисления на примере водных растворов фенола. Фенол относится к веществам, которые в определенных условиях способны образовывать полиароматические углеводороды, обладающие крайне высокой токсичностью для большинства живых систем. На основании данных свойств фенол является приоритетным загрязняющим веществом в списке USEPA с максимально допустимой концентрацией в воде порядка 0,5 мг/л. Из-за относительно высокой химической стойкости фенола традиционные методы очистки сточных вод, такие как биологическая очистка, адсорбция, не позволяют очищать воду с высокой эффективностью [18-20]. Огромное количество работ от ведущих научных коллективов со всего мира посвящены вопросам удаления фенола и его производных методами каталитического окисления на воздухе и в водных растворах, процессам Фентона, фото-Фентона и комбинированным соно-фотофентоновским процессам. Большинство исследовательских групп считают, что применение фото-Фентон процессов являются наиболее перспективным направлением очистки воды от фенола и других органических соединений [21-23]. Пероксид водорода, как основной окислитель Фентон-процесса, отличается относительно низкой стоимостью, экологичностью и высоким содержанием активного кислорода. В процессе фото-каталитического разложения пероксида водорода образуется гидроксил радикал и вода, а присутствие в воде соединений железа увеличивает выход гидроксил радикалов, обладающих крайне высоким (уступают только фтору) окислительным потенциалом $E=2,8$ эВ, который способен разрушать большинство органических загрязняющих веществ [24]. Доза пероксида водорода, и количество катализирующих соединений Fe^{2+} оказывают прямое влияние на скорость и полноту протекания фото-Фентон процесса. Помимо увеличения стоимости затрат на процесс очистки и образования значительного количества трудно фильтруемого осадка гидроксидов/оксидов железа могут возникать эффекты адсорбции соединений железа на поверхности органических веществ, что в свою очередь влияет на кинетику процесса окисления. С целью повышения эффективности деструкции и оптимизации операционных и реагентных затрат фото-Фентон процесс оптимизируют под каждый отдельный вид стоков. Из-за сложной системы процесса каталитического разложения фото-Фентона применение подхода оптимизации по одному фактору может привести к ошибке, ввиду отсутствия возможности учесть эффекты, возникающие в результате перекрестного сопоставления отдельных параметров. В последних исследованиях [15] сообщается, что катализатор Фентон-процесса на основе оксалатов щелочных металлов может

разлагать загрязняющие вещества без корректировки pH, а также эффективен при нейтральных значениях pH. Фактически, Баутиц и Ногур [25] сообщили, что Fe-оксалатные катализаторы имеют более высокую каталитическую способность к генерации гидроксил радикала, чем железо из конвекционных нитратных и сульфатных солей, что, по-видимому, объясняется изменением механизма разложения пероксида водорода в присутствии органических лигандов. Все описанные данные характерны для гомогенного фото-Фентон процесса. Основным недостатком гомогенного процесса Фентона является отсутствие возможности регенерации катализатора, а также образованием значительного количества железосодержащего шлама, который необходимо эффективно извлечь из обработанной воды и утилизировать. Таким образом, для решения указанной проблемы был применен гетерогенный катализ с использованием закрепленного твердого катализатора разложения пероксида водорода [26]. Процесс гетерогенного катализа отличается относительно низкой по сравнению с гомогенным катализом скоростью, за счет диффузионного сопротивления реагентов в порах, а также проблемы массопереноса продуктов окисления из пор в раствор. Для минимизации подобных трудностей может быть применена кислотная модификация материала-носителя для катализатора. Процесс модификации позволяет раскрыть поры и увеличивает площадь поверхности контакта, а также снижает или устраняет диффузионные сопротивления в катализаторах. Механизм фотоокисления с помощью Фентон-процесса выглядит как [27]:



В данной схеме мы видим на 1-4 стадиях образование катионов Fe^{3+} и Fe^{2+} , которые, способны связываться в комплексные соединения с широким диапазоном констант устойчивости. В результате комплексообразования возможно незначительное увеличение скорости и степени фотоокисления исследуемого органического соединения. С учетом приведенных выше данных о влиянии оксалата на эффективность процесса можно сделать вывод, что пусть и незначительное, но связывание, может изменить эффективность процесса и, что вполне вероятно, избежать каких-либо дополнительных процессов для регенерации катализатора и разделения реакционной смеси. Также вполне возможно, что косвенное влияние и связывание катионов может повлиять на свойство окисляемого субстрата (например, на редокс-потенциал).

Вторым по распространенности после фенола органическим загрязняющим веществом является

формальдегид. Формальдегид (НСНО), выделяющийся из строительных, отделочных материалов и потребительских товаров, является одним из доминирующих летучих органических соединений (ЛОС), обнаруживаемых в помещении. Формальдегид способствует появлению злокачественных новообразований носа, оказывает раздражающее действие на слизистые оболочки глаз и дыхательных путей, а также может вызывать аллергические кожные реакции. Ввиду возрастающего внимания к проблеме воздействия НСНО на человека, процессы снижения уровня НСНО обретают высокий практический интерес. Особую актуальность имеют процессы удаления НСНО при низких и комнатных температурах [28]. Ряд исследований, связанных с удалением НСНО из водных сред, проведены с использованием перманганата калия, активированного угля, оксида алюминия и др. веществ [29]. Процессы адсорбции показали высокую эффективность, однако низкое время защитного действия и необходимость регенерации/утилизации адсорбентов существенно снижают практическую ценность данного метода [30-32]. Каталитическое окисление – одна из наиболее перспективных технологий борьбы с выбросами ЛОС, поскольку конечными продуктами реакции при оптимальных условиях (катализатор, скорость, температура и концентрация) являются CO_2 и H_2O . Обычно в качестве катализатора используют благородный металл (Pt, Pd, Rh и Au) или оксиды металлов (Ag, Cu, Cr и Mn). Авторами [33-35] обнаружено, что серебро-твердый оксид церия был активен в процессах окислительной деструкции НСНО выше $150.8\text{ }^\circ\text{C}$. В статьях [36, 37] встречается информация о высокоэффективном катализаторе на основе Pt/TiO₂, на котором полное окисление НСНО может протекать при комнатной температуре. Было отмечено, что TiO₂ может стать высокоэффективным и перспективным катализатором для процессов низкотемпературного окисления НСНО, где происходит непосредственное связывание субстрата с катализатором в рамках активных центров. На основании представленных данных, можно сделать вывод, что именно степень взаимодействия субстрата с поверхностью будет оказывать прямое влияние на полноту деструкции НСНО.

Таким образом, если влияние связывания органических молекул с диоксидом титана очевидно в связи с известным механизмом гетерогенного фотокатализа, то влияние комплексообразования на окислительно-восстановительные свойства железа и окисляемого субстрата еще до конца не выявлено. Комплексообразование влияет на физико-химические свойства реагентов и продуктов, тем самым влияя на кинетику и механизм процесса окисления (меняется потенциал соединений). Однако работы по фотокаталитическому окислению и его применению по-прежнему ведутся и многие его аспекты, преимущества и недостатки еще подлежат выяснению.

Список литературы

1. Tufail A., Price W.E., Hai F.I. A critical review on advanced oxidation processes for the removal of trace organic contaminants: A voyage from individual to integrated processes // *Chemosphere*. Elsevier Ltd, 2020. Vol. 260. P. 127.
2. Varanasi L. et al. Transformations of dissolved organic matter induced by UV photolysis, hydroxyl radicals, chlorine radicals, and sulfate radicals in aqueous-phase UV-Based advanced oxidation processes // *Water Res.* Elsevier, 2018. Vol. 135. P. 22–30.
3. Asghar A., Raman A.A.A., Daud W.M.A.W. Advanced oxidation processes for in-situ production of hydrogen peroxide/hydroxyl radical for textile wastewater treatment: a review // *J. Clean. Prod.* Elsevier, 2015. Vol. 87. P. 826–838.
4. Wang J.L., Xu L.J. Advanced oxidation processes for wastewater treatment: formation of hydroxyl radical and application // *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* Taylor & Francis, 2012. Vol. 42, № 3. P. 251–325.
5. Anipsitakis G.P., Dionysiou D.D. Degradation of organic contaminants in water with sulfate radicals generated by the conjunction of peroxymonosulfate with cobalt // *Environ. Sci. Technol.* ACS Publications, 2003. Vol. 37, № 20. P. 4790–4797.
6. Yang Y. et al. Production of sulfate radical and hydroxyl radical by reaction of ozone with peroxymonosulfate: a novel advanced oxidation process // *Environ. Sci. Technol.* ACS Publications, 2015. Vol. 49, № 12. P. 7330–7339.
7. Jiang L., Wang Y., Feng C. Application of photocatalytic technology in environmental safety // *Procedia Eng.* 2012. Vol. 45. P. 993–997.
8. Chen X. et al. Synthesis and photocatalytic activity of mesoporous TiO₂ nanoparticle using biological renewable resource of un-modified lignin as a template // *Microporous Mesoporous Mater.* Elsevier, 2016. Vol. 223. P. 145–151.
9. Yasuda M. et al. The effect of TiO₂-photocatalytic pretreatment on the biological production of ethanol from lignocelluloses // *J. Photochem. Photobiol. A Chem.* Elsevier, 2011. Vol. 220, № 2–3. P. 195–199.
10. Kaur N. Photochemical reactions as key steps in five-membered N-heterocycle synthesis // *Synth. Commun.* 2018. Vol. 48, № 11. P. 1259–1284.
11. Yong C., Feng W. Environmental photochemistry: theory and application // *Res. J. Chem. Environ.* 2011. Vol. 15, № 2. P. 1–3.
12. Puicharla R. et al. A persistent antibiotic partitioning and co-relation with metals in wastewater treatment plant - Chlortetracycline // *J. Environ. Chem. Eng.* 2014. Vol. 2, № 3, P. 25–30.
13. Elmolla E.S., Chaudhuri M. Photocatalytic degradation of amoxicillin, ampicillin and cloxacillin antibiotics in aqueous solution using UV/TiO₂ and UV/H₂O₂/TiO₂ photocatalysis // *Desalination*. Elsevier, 2010. Vol. 252, № 1–3. P. 46–52.
14. Chen Y. et al. Photodegradation of tetracycline and formation of reactive oxygen species in aqueous tetracycline solution under simulated sunlight irradiation

- // J. Photochem. Photobiol. A Chem. Elsevier, 2008. Vol. 197, № 1. P. 81–87.
15. Ayodele O.B., Lim J.K., Degradation of phenol in photo-Fenton process by phosphoric acid modified kaolin supported ferric-oxalate catalyst: optimization and kinetic modeling // Chem. Eng. J. Elsevier, 2012. Vol. 197. P. 181–192.
16. Duesterberg C.K., Waite T.D. Process optimization of fenton oxidation using kinetic modeling // Environ. Sci. Technol. 2006. Vol. 40, № 13. P. 4189–4195.
17. Ivantsova N.A., Panicheva D.A., Kuznetsov O.Y. Oxidative Destruction of Phenol in Aqueous Solution by Cotreatment with UV Radiation and Hydrogen Peroxide // High Energy Chem. Springer, 2020. Vol. 54, № 1. P. 10–14.
18. Dąbrowski A. et al. Adsorption of phenolic compounds by activated carbon: a critical review // Chemosphere. Elsevier, 2005. Vol. 58, № 8. P. 1049–1070.
19. Soto M.L. Recovery, concentration and purification of phenolic compounds by adsorption: A review // J. Food Eng. Elsevier, 2011. Vol. 105, № 1. P. 1–27.
20. Kulkarni S.J., Kaware J.P. Review on research for removal of phenol from wastewater // Int. J. Sci. Res. Publ. 2013. Vol. 3, № 4. P. 1–5.
21. Babuponnusami A., Muthukumar K. Degradation of phenol in aqueous solution by fenton, sono-fenton and sono-photo-fenton methods // Clean–Soil, Air, Water. Wiley Online Library, 2011. Vol. 39, № 2. P. 142–147.
22. Feng H.E. Degradation kinetics and mechanisms of phenol in photo-Fenton process // J. Zhejiang Univ. A. Springer, 2004. Vol. 5, № 2. P. 198–205.
23. Esproa C., Marini S., Galvagno S. New Perspectives in Removal of Organic Pollutants from Industrial Wastewater mediated by the Fenton Process // Int. J. Appl. Eng. Res. 2017. Vol. 12, № 14. P. 4356–4364.
24. Burek B.O., Bahnemann D.W., Bloh J.Z. Modeling and optimization of the photocatalytic reduction of molecular oxygen to hydrogen peroxide over titanium dioxide // ACS Catal. ACS Publications, 2018. Vol. 9, № 1. P. 25–37.
25. Bautitz I.R., Nogueira R.F.P. Photodegradation of lincomycin and diazepam in sewage treatment plant effluent by photo-Fenton process // Catal. today. Elsevier, 2010. Vol. 151, № 1–2. P. 94–99.
26. Lv H. et al. Efficient degradation of high concentration azo-dye wastewater by heterogeneous Fenton process with iron-based metal-organic framework // J. Mol. Catal. A Chem. Elsevier, 2015. Vol. 400. P. 81–89.
27. Nitoi I., Oncescu T., Oancea P. Mechanism and kinetic study for the degradation of lindane by photo-Fenton process // J. Ind. Eng. Chem. Elsevier, 2013. Vol. 19, № 1. P. 305–309.
28. Fang R. et al. Effect of redox state of Ag on indoor formaldehyde degradation over Ag/TiO₂ catalyst at room temperature // Chemosphere. Elsevier, 2018. Vol. 213. P. 235–243.
29. Moussavi G., Yazdanbakhsh A., Heidarizad M. The removal of formaldehyde from concentrated synthetic wastewater using O₃/MgO/H₂O₂ process integrated with the biological treatment // J. Hazard. Mater. Elsevier, 2009. Vol. 171, № 1–3. P. 907–913.
30. Wen Q. Study on activated carbon derived from sewage sludge for adsorption of gaseous formaldehyde // Bioresour. Technol. Elsevier, 2011. Vol. 102, № 2. P. 942–947.
31. Salman M. Removal of formaldehyde from aqueous solution by adsorption on kaolin and bentonite: a comparative study // Turkish J. Eng. Environ. Sci., 2012. Vol. 36, № 3. P. 263–270.
32. Boonamnuayvitaya V., Sae-ung S., Tanthapanichakoon W. Preparation of activated carbons from coffee residue for the adsorption of formaldehyde // Sep. Purif. Technol. Elsevier, 2005. Vol. 42, № 2. P. 159–168.
33. Imamura S. Oxidative decomposition of formaldehyde on silver-cerium composite oxide catalyst // Catal. Letters. Springer, 1994. Vol. 24, № 3. P. 377–384.
34. Ma L. et al. Ag/CeO₂ nanospheres: Efficient catalysts for formaldehyde oxidation // Appl. Catal. B Environ. Elsevier, 2014. Vol. 148. P. 36–43.
35. Ma L. et al. Sodium-promoted Ag/CeO₂ nanospheres for catalytic oxidation of formaldehyde // Chem. Eng. J. Elsevier, 2018. Vol. 350. P. 419–428.
36. Nie L. et al. Enhanced performance of NaOH-modified Pt/TiO₂ toward room temperature selective oxidation of formaldehyde // Environ. Sci. Technol. ACS Publications, 2013. Vol. 47, № 6. P. 2777–2783.
37. Zhu X. et al. Halogen poisoning effect of Pt-TiO₂ for formaldehyde catalytic oxidation performance at room temperature // Appl. Surf. Sci. Elsevier, 2016. Vol. 364. P. 808–814.