

Оригинальные статьи

Научная статья

УДК 546.735:539.1.044

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2023.25/11105>

Влияние УФ-излучения на каталитическую активность наноразмерного феррита кобальта в реакции окислительной деструкции динитрофенола

Е. В. Томина^{1,2✉}, Во Куанг Май³, Н. А. Куркин¹, А. В. Дорошенко¹, Нгуен Ань Тьен⁴, А. А. Синельников¹

¹Воронежский государственный университет,
Университетская пл., 1, Воронеж 394018, Российская Федерация

²Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова,
ул. Тимирязева, 8, Воронеж 394087, Российская Федерация

³Университет Сайгона,
ул. Ан Зьонг-Вьонг, 273, округ 3, район 5, Хошимин, Вьетнам

⁴Педагогический университет Хошимина,
ул. Ан Зьонг-Вьонг, 280, округ 4, район 5, Хошимин, Вьетнам

Аннотация

Ферриты-шпинели как легированные, так и нелегированные, в силу своей полифункциональности являются перспективными материалами для широкого спектра практических приложений, включая катализ, устойчивое производство водорода и депонирование CO₂, электронные и магнитные устройства, антибактериальные средства. В последнее время наноразмерные ферриты активно тестируются как катализаторы в фентоноподобных процессах глубокой окислительной деструкции органических веществ с целью очистки сточных вод от различных красителей, фенола и его производных, антибиотиков. Целью работы являлось установление каталитической активности синтезированного методом цитратного горения нанопорошка CoFe₂O₄ в реакции окислительной деструкции 2,4-динитрофенола при активации процесса УФ-излучением.

Методом цитратного горения синтезирован не содержащий примесей нанопорошок феррита кобальта CoFe₂O₄ со средним размером частиц порядка 70 нм и явно выраженной агломерацией частиц. Осуществлено тестирование кобальтовой шпинели как катализатора фентоноподобной реакции окислительной деструкции 2,4-динитрофенола при УФ-облучении с λ = 270 нм. Проведено дифференцирование данного процесса с сорбцией динитрофенола на наноразмерном катализаторе.

Степень деструкции 2,4 – динитрофенола в фентоноподобной реакции без катализатора CoFe₂O₄ составляет 14 %, тогда как в присутствии наноразмерного катализатора она возрастает до 80 %. Эффективная окислительная деструкция поллютанта осуществлена в менее кислой среде в сравнении с классическим Фентон-процессом при достаточно большой исходной концентрации динитрофенола. Это позволяет рассматривать наноразмерный CoFe₂O₄ как перспективный катализатор фентоноподобных процессов очистки сточных вод путем глубокой окислительной деструкции токсикантов.

Ключевые слова: катализ, наноразмерные ферриты, очистка сточных вод, ультрафиолетовое излучение

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-23-00122, <https://rscf.ru/project/23-23-00122/>

Результаты исследований частично получены на оборудовании Центра коллективного пользования Воронежского государственного университета. URL: <http://ckp.vsu.ru>.

✉ Томина Елена Викторовна, e-mail: tomina-e-v@yandex.ru

© Томина Е. В., Во Куанг Май, Куркин Н. А., Дорошенко А. В., Нгуен Ань Тьен, Синельников А. А., 2023



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Томина Е. В., Во Куанг Май, Куркин Н. А., Дорошенко А. В., Нгуен Ань Тьен, Синельников А. А. Влияние УФ-излучения на каталитическую активность наноразмерного феррита кобальта в реакции окислительной деструкции динитрофенола. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2023;25(2): 249–256. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2023.25/11105>

For citation: Tomina E. V., Vo Quang Mai, Kurkin N. A., Doroshenko A. V., Nguyen Anh Tien, Sinelnikov A. A. Influence of UV radiation on the catalytic activity of nanosized cobalt ferrite in the oxidative degradation reaction of dinitrophenol. *Condensed Matter and Interphases*. 2023;25(2): 249–256. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2023.25/11105>

1. Введение

К значительному антропогенному воздействию в настоящее время относят загрязнение природных вод стоками промышленных и сельскохозяйственных производств. Одними из наиболее распространенных токсикантов, поступающих в поверхностные воды от предприятий нефтеперерабатывающей, лесохимической, коксохимической, анилинокрасочной, текстильной и гидролизной промышленности, являются фенолы и их производные. Особо токсичными представляются нитрофенольные соединения, такие как, например, нитроцен и динитрофенолы. Тем не менее динитрофенолы достаточно широко используются в сельском хозяйстве вследствие их выраженного одновременного гербицидного, фунгицидного, инсектицидного действий, выступают в качестве прекурсоров в производстве красителей, антисептиков для древесины. Необходимо отметить, что пестициды динитрофенольного ряда обладают способностью к кумуляции, что делает задачу их инактивации еще более актуальной [1].

Наиболее надежным и эффективным способом считается полная окислительная деструкция нитропроизводных фенола до нетоксичных веществ. В этом отношении большой интерес вызывают Фентон-процессы, в которых пероксид водорода за счет разложения под действием катализатора выступает в качестве источника более мощных окислителей, в первую очередь, гидроксил-радикалов, редокс-потенциал которых в зависимости от pH принимает значения от +2.0 до +2.8 В [2, 3]. В качестве гетерогенных катализаторов Фентона используются, например, железосодержащие материалы на основе мезопористого диоксида кремния, цеолиты и др. [4, 5].

Перспективными в этом плане представляются наноразмерные ферриты-шпинели MeFe_2O_4 [6–10], каталитическая активность которых значительно усиливается вследствие высокой площади удельной поверхности и возможности активации ультрафиолетовым излучением.

Ферриты-шпинели уже используются в ряде технологий «зеленой химии», таких как очист-

ка сточных вод [11–13], депонирование углерода [14], антимикробная обработка [15]. В случае фотохимических процессов вследствие комбинации излучения с действием различных окислителей, наиболее распространенным из которых является пероксид водорода, и катализаторов значительно повышается редокс-потенциал системы, а, следовательно, и степень окислительной деструкции загрязнителей. Таким образом, целью данной работы является установление каталитической активности синтезированного методом цитратного горения нанопорошка CoFe_2O_4 в реакции окислительной деструкции 2,4-динитрофенола при активации процесса УФ-излучением.

2. Экспериментальная часть

Синтез феррита-шпинели CoFe_2O_4 методом цитратного горения осуществляли согласно [16]. Фазовый состав образцов нанопорошка определяли методом рентгеновской дифрактометрии (дифрактометр Empyrean B.V. с анодом Cu ($\lambda = 1.54060$ нм)). Съемку проводили в интервале углов $2\theta = 10–80^\circ$ с шагом 0.0200. Для идентификации фаз использовалась база данных JCPDC [17]. О размере и морфологии частиц CoFe_2O_4 делали выводы по данным просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ, просвечивающий электронный микроскоп CarlZeiss Libra-120). Количественный элементный анализ проводили на растровом электронном микроскопе JSM-6380LV JEOL с системой микроанализа INCA 250.

Исследование каталитической активности нанопорошка феррита кобальта проводили на реакции окисления 2,4-динитрофенола (ДНФ) пероксидом водорода. Для этого готовили раствор, содержащий 0.084 г/л 2,4-динитрофенола и 10 масс. % пероксида водорода. Уровень pH раствора, равный 4.4, поддерживали ацетатным буфером. Затем в серию проб растворов объемом 15 мл добавляли по 0.25 г феррита кобальта и измеряли концентрацию ДНФ через определенные временные интервалы после начала реакции. Аналогично проводили контрольные измерения концентраций растворов ДНФ без катализатора. Эксперимент проводили при дневном

освещении и при ультрафиолетовом облучении с $\lambda = 270$ нм (УФ-лампа Nuobi, 20 Вт). Концентрацию ДНФ определяли методом фотоколориметрии (фотоколориметр «КФК-3-01»). Аналитическая длина волны для 2,4-динитрофенола составляла 364 нм. Степень деструкции ДНФ рассчитывали по формуле (1):

$$W = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где W – степень деструкции %, C_0 – концентрация красителя в начальный момент времени, C_t – концентрация красителя в данный момент времени.

Для дифференциации каталитической окислительной деструкции ДНФ и его сорбции на наноразмерном катализаторе был выполнен эксперимент по вышеописанной методике без добавления в растворы окислителя H_2O_2 . В этом случае окислительная деструкция ДНФ не осуществлялась, а деколоризация растворов обуславливалась только сорбцией поллютанта на феррите кобальта. Время статической сорбции составляло 2.5 часа. Сорбционную емкость феррита кобальта определяли по уравнению (2):

$$A = \frac{(C_0 - C) \cdot V}{m}, \quad (2)$$

где C_0 – начальная концентрация раствора ДНФ, моль/л; C – концентрация ДНФ через определенное время после начала реакции, моль/л; V – объем раствора адсорбата, л; m – масса феррита кобальта, г.

Достоверность результатов определяли методами статистического анализа. Закон распределения результатов определяли по критерию Колмогорова. Статистическую значимость определяли по критерию Стьюдента.

3. Результаты и обсуждение

Синтезированный методом цитратного голения порошок феррита кобальта согласно результатам РФА (рис. 1) не содержит примесей, все рефлексы на дифрактограмме относятся к шпинели $CoFe_2O_4$ (JCPDC, карточка 22-1086).

Средний размер областей когерентного рассеяния (ОКР) частиц $CoFe_2O_4$, рассчитанный с использованием формулы Дебая–Шеррера [18], составляет 61 ± 4 нм.

Средние значения массовых и атомных процентов элементов Co, Fe, O по данным энергодисперсионного анализа приведены в табл. 1, результаты соответствуют ожидаемому химическому составу.

По данным ПЭМ порошок феррита кобальта (рис. 2а) сильно агломерирован, что может

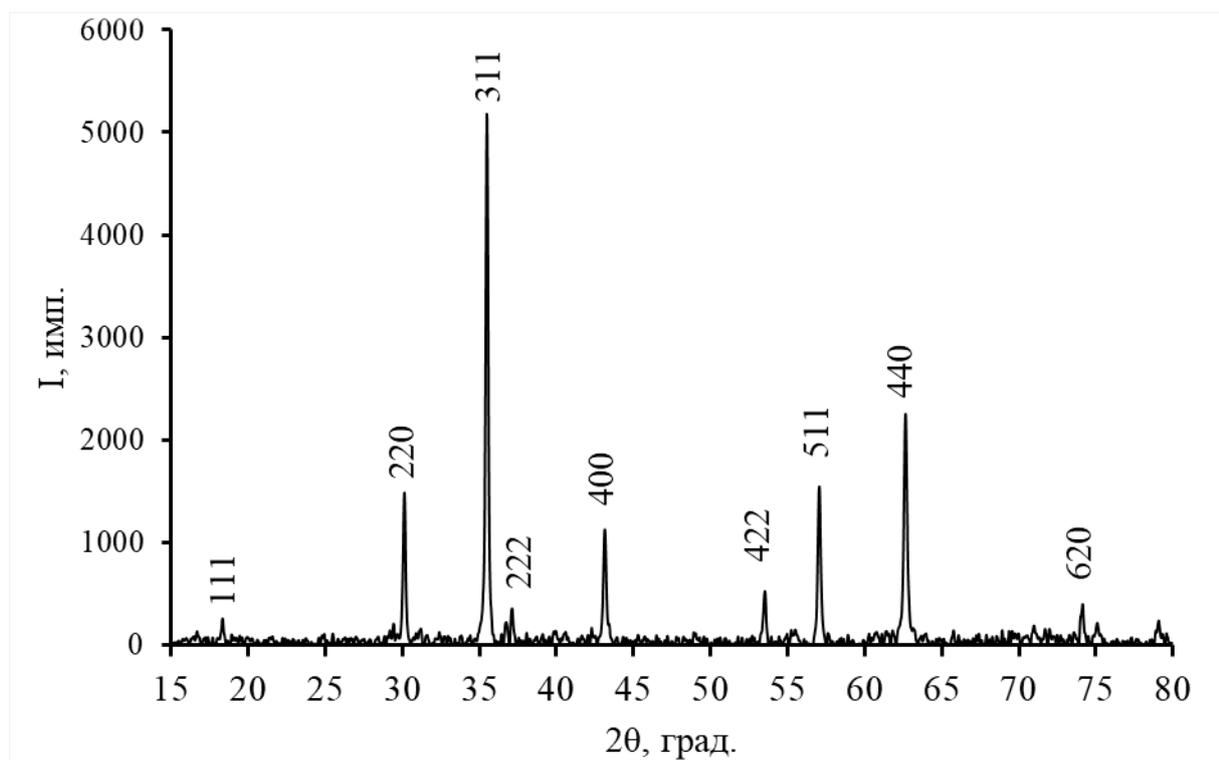


Рис. 1. Дифрактограмма синтезированного цитратным методом порошка $CoFe_2O_4$

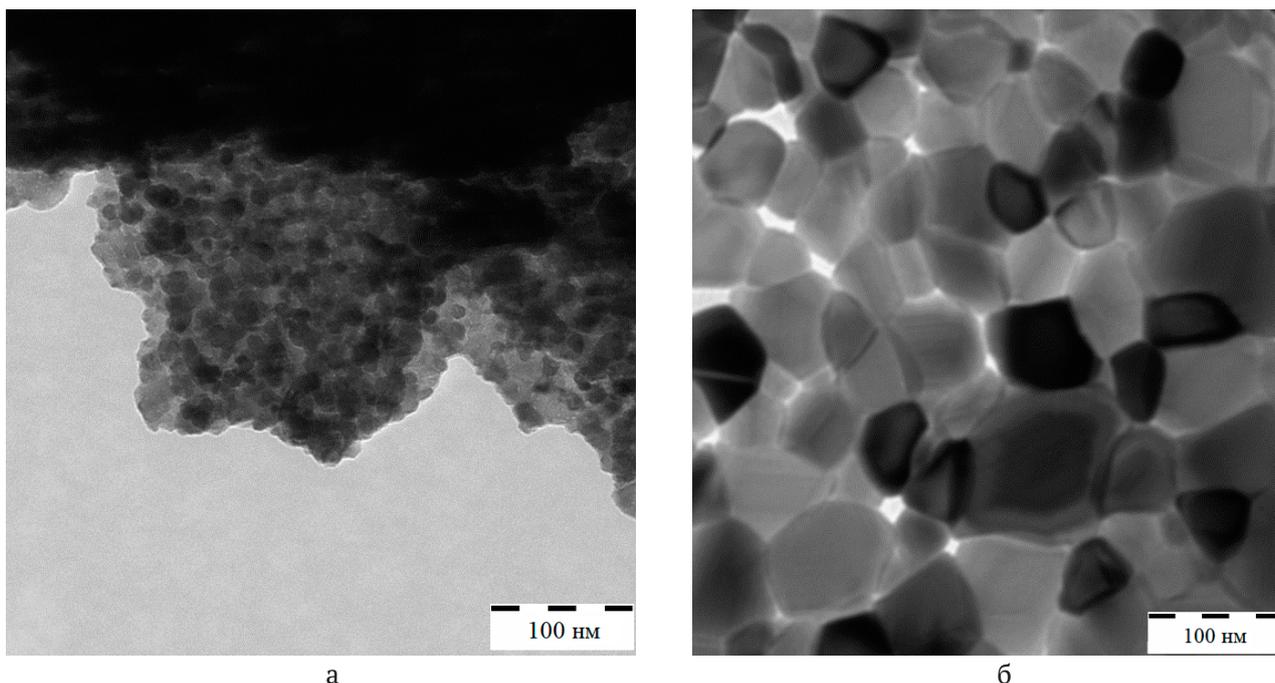


Рис. 2. ПЭМ изображения образца CoFe_2O_4 до (а) и после ультразвукового диспергирования (б)

Таблица 1. Результаты энергодисперсионного анализа нанопорошка шпинели

Элемент	Весовой %	Атомный %
O	27.45	56.82
Fe	47.40	28.73
Co	25.15	14.44

быть связано с особенностями метода синтеза. Дополнительное ультразвуковое диспергирование нанопорошка в ультразвуковой ванне ВУ-09-«Я-ФП»-0 в течение 20 мин позволяет снизить степень агломерации, так что на ПЭМ изображении представляется возможным выделить отдельные наночастицы и оценить их форму и размер (рис. 2б). Образец CoFe_2O_4 представлен наночастицами неправильной округлой формы, некоторые частицы имеют огранку. Преобладающее число частиц имеет размер в диапазоне от 50–90 нм, средний размер частиц составляет порядка 70 нм. Расчетные данные значений ОКР по данным РФА в целом коррелируют с результатами ПЭМ.

Экспериментально установлено, что синтезированный цитратным методом нанопорошок кобальтовой шпинели является эффективным гетерогенным катализатором фентоноподобных реакций. Окислительная деструкция ДНФ под воздействием УФ излучения в присутствии катализатора CoFe_2O_4 протекает более интенсивно, чем в его отсутствие (рис. 3а). Так, концент-

рация ДНФ при каталитическом окислении через 2.5 часа после начала реакции уменьшается в 5 раз. В отсутствие катализатора после 2.5 часов реакции концентрация динитрофенола уменьшается только в 1.4 раза. Для комбинации окислителя H_2O_2 с УФ излучением степень деструкции ДНФ составляет 29 %, тогда как введение в систему наноразмерного катализатора разложения пероксида водорода увеличивает степень деструкции до 80 %.

Кинетические кривые окислительной деструкции ДНФ по форме соответствуют псевдопервому порядку реакции. Оценка константы скорости проводилась путем линеаризации кинетических зависимостей в логарифмических координатах (рис. 3б). Константа скорости окислительной деструкции ДНФ в присутствии CoFe_2O_4 при УФ облучении составила 0.102 мин^{-1} , а в отсутствие катализатора на порядок меньше – 0.0019 мин^{-1} . Значение константы скорости окисления динитрофенола сопоставимо со значениями в [19], полученными для более кислой среды ($\text{pH} \leq 3$) и исходной концентрации ДНФ в 8 раз меньше, нежели в данной работе. В [10] рассчитанная константа скорости фотодеструкции красителя метиленового синего в присутствии наноразмерного MgFe_2O_4 составляет 0.0117 мин^{-1} при УФ-облучении двумя Хе-дуговыми лампами мощностью 35 Вт каждая в течение двух часов. В [20] константа скорости фоторазложения этого же красителя с участием CoFe_2O_4 как катали-

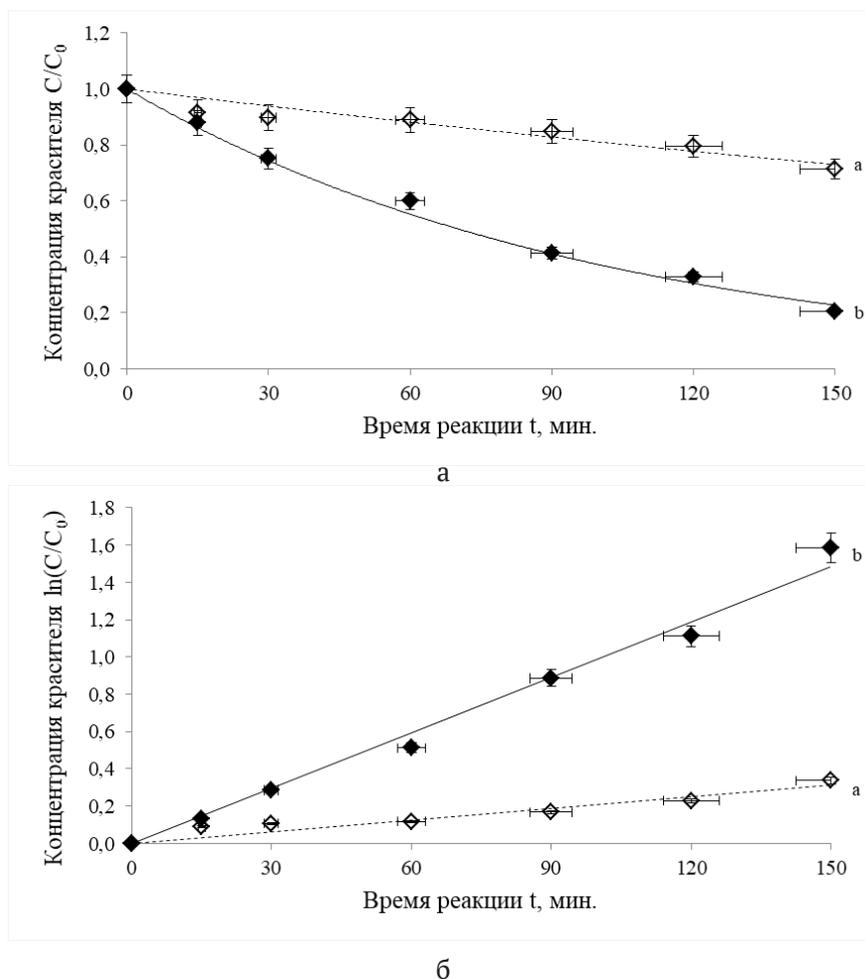


Рис. 3. Изменение концентрации ДНФ при воздействии УФ-облучения в координатах C/C_0 (а) и $\ln(C/C_0)$ (б) (а – без катализатора, б – в присутствии катализатора CoFe_2O_4)

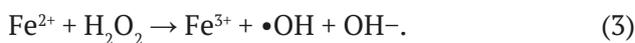
затора и H_2O_2 как окислителя при дневном освещении, но в значительно более кислой среде ($\text{pH} = 2.5$), составляет 0.078 мин^{-1} . Разложение же красителя Родаминовый 6 в присутствии CoFe_2O_4 в темноте при $\text{pH} = 2$ [21] протекает гораздо медленнее (константа скорости равна 0.0041 мин^{-1}), что позволяет сделать вывод о том, что pH реакционной среды, тип и мощность освещения являются одними из основных определяющих скорость реакции факторов.

При протекании реакции при естественном освещении каталитический эффект CoFe_2O_4 выражен весьма слабо. Степень деструкции ДНФ составляет всего 14 %, хотя необходимо отметить, что в отсутствие катализатора окислительная деструкция 2,4-динитрофенола практически не осуществляется (степень деструкции 0.13 %).

Основными параметрами, влияющими на протекание гетерогенного катализа по типу Фентона, выступают концентрация и доступ-

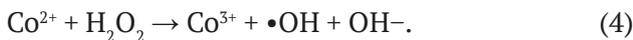
ность активных центров катализатора, pH , концентрация H_2O_2 , исходное содержание органических поллютантов и сопутствующих ионов. Для классического гомогенного Фентон-процесса оптимальным является значение pH от 2.8 до 3.5 [22]. При большем pH ионы Fe^{2+} окисляются, образуя комплексные гидроксо соединения, и снижается окислительная активность H_2O_2 .

Механизм окислительной деструкции в гетерогенных фентоноподобных реакциях заключается в образовании сильных окислителей ($\text{OH}\cdot$) в процессе обратимого перехода из Fe^{2+} в Fe^{3+} под действием света. В [23] показано, что тетраэдрические центры Fe^{3+} обладают электроноакцепторными свойствами, а образующиеся ионы Fe^{2+} являются активными центрами фентоноподобных процессов:



В случае кобальтовой шпинели и для иона кобальта (+2) осуществляется реакция с образова-

нием гидроксил-радикалов, что подтверждается и данными [24]:



Ион Fe^{3+} способен к регенерации в Fe^{2+} (особенно при УФ облучении) с образованием дополнительного количества гидроксильных и пергидроксильных радикалов, которые участвуют в окислении ДНФ, что и повышает степень деструкции до 80 % по сравнению с дневным освещением:



Видимо, в нашем случае при дневном освещении значение $\text{pH} = 4.4$ и высокая исходная концентрация ДНФ определяют достаточно низкую степень деструкции поллютанта.

Серия экспериментов по окислению ДНФ в комбинации $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{CoFe}_2\text{O}_4 + \text{УФ}$ и в присутствии CoFe_2O_4 при УФ облучении без пероксида водорода как окислителя однозначно показала, что в первом случае деструкция ДНФ идет преимущественно за счет образования сильных окислителей при каталитическом разложении H_2O_2 . Отсутствие окислителя выявило слабую сорбционную способность кобальтовой шпинели в отношении ДНФ, концентрация токсиканта уменьшается всего на 5 % (рис. 4). В этих условиях Fe^{3+} можно рассматривать как возможный окислитель динитрофенола, однако полученные данные позволяют сделать вывод о незначительности этого вклада в суммарный процесс.

Уменьшение концентрации ДНФ за счет сорбции составляет порядка 5 % (рис. 4б), что коррелирует с рассчитанной очень малой сорб-

ционной емкостью феррита кобальта, и, возможно, связано с сильной агломерированностью нанопорошка CoFe_2O_4 . Необходимо заметить, что невысокая площадь удельной поверхности характерна и для кобальтовой шпинели, синтезированной методом соосаждения [25]. Сорбционная емкость CoFe_2O_4 достигает максимального значения (всего 0.2 мкмоль/г) за 15 мин (рис. 4, вставка), а затем практически не изменяется. Из этого следует вывод о незначительном вкладе сорбции в общий процесс деструкции ДНФ в присутствии наноразмерного катализатора CoFe_2O_4 в фентоноподобном процессе.

Таким образом, проведенная оценка каталитической активности наноразмерной кобальтовой шпинели в реакциях окислительной деструкции 2,4-динитрофенола позволяет рассматривать CoFe_2O_4 в качестве основы для создания гетерогенных катализаторов Фентона, в том числе, и композитных.

4. Заключение

Методом цитратного горения синтезирована шпинель CoFe_2O_4 со средним размером частиц порядка 70 нм. Характерной особенностью нанопорошка является сильная агломерация частиц как следствие выбранного метода синтеза. Установлена высокая каталитическая активность нанодисперсного CoFe_2O_4 в фентоноподобных реакциях окислительной деструкции 2,4-динитрофенола при облучении ультрафиолетом $\lambda = 270$ нм в менее кислой среде в сравнении с классическим Фентон-процессом и при значительно большей исходной концентрации поллютанта. Степень деструкции ДНФ без катали-

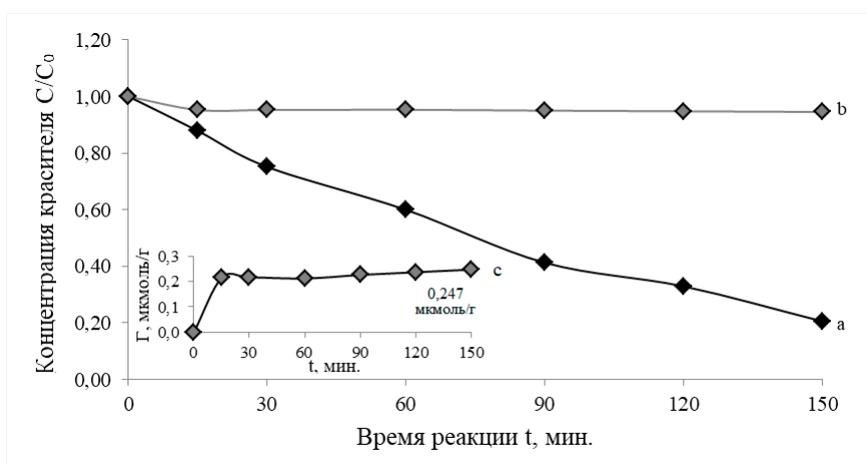


Рис 4. Кривые каталитического окисления (а) и сорбции (б) ДНФ в присутствии CoFe_2O_4 , (с) – сорбционная емкость образца

затора составляет 14 %, в присутствии наноразмерного катализатора CoFe_2O_4 – 80 %.

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

Список литературы

1. Ting Li Zhu F., Liang W., ... Guan J. Simultaneous removal of p-nitrophenol and Cr(VI) using biochar supported green synthetic nano zero valent iron-copper: Mechanistic insights and toxicity evaluation. *Process Safety and Environmental Protection*. 2022;146: 629–640. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.09.049>
2. Зеленская Е. А., Чернышев В. М., Шабельская Н. П., Сулима С. И., Сулима Е. В., Семченко В. В., Власенко А. И. Изучение каталитической активности оксидов переходных элементов в реакции разложения пероксида водорода. *Фундаментальные исследования*. 2016;4: 261–265. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=vvvjhh>
3. Артемьянов А. П., Земскова Л. А., Иванов В. В. Каталитическое жидкофазное окисление фенола в водных средах с использованием катализатора углеродное волокно/(железо, оксид железа). *Известия высших учебных заведений. Серия: химия и химическая технология*. 2017;60(8); 88–95. <https://doi.org/10.6060/tcct.2017608.5582>
4. Иванцова Н. А., Матвеева А. А., Тимашева Н. А. Каталитическое окисление красителя метиленового синего кислородом воздуха в присутствии железной стружки и пероксида водорода *Экологическая химия*. 2012;21(2); 81–85. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22266544>
5. Чечерина А. Ю., Стоянова А. Д., Конькова Т. В. Применение физико-химических методов для очистки сточных вод, содержащих органический краситель и глину таганского месторождения. *Успехи в химии и химической технологии*. 2021;35(6); 122–124. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47194891>
6. Petrova E., Kotsikau D., Pankov V., Fahmi A. Influence of Synthesis Methods on Structural and Magnetic Characteristics of Mg–Zn–Ferrite Nanopowders. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2019;473; 85–91. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.09.128>
7. Somnath S., Indu S., Kotnala R. K., ... Kumar G. Structural magnetic and mössbauer studies of Nd-doped Mg–Mn ferrite nanoparticles. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2017;444; 77–86. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.08.017>
8. Rao K. S., Nayakulu S. V. R., Varma M. C., Choudary G. S. V. R. K., Rao K. H. Controlled phase evolution and the occurrence of single domain CoFe_2O_4 nanoparticles synthesized by PVA assisted sol-gel method. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2018;451(1); 602–608. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.11.069>
9. Mittova I. Ya., Perov N. S., Tomina E. V., Pan'kov V. V., Sladkoptsev B. V. Multiferroic nanocrystals and diluted magnetic semiconductors as a base for designing magnetic materials. *Inorganic Materials*. 2021;57(13); 22–48. <https://doi.org/10.1134/S0020168521130033>
10. Лебедев Л. А., Теневич М. И., Попков В. И. Влияние режима растворного горения на структуру, морфологию и размерно-чувствительные фотокаталитические свойства нанопорошков MgFe_2O_4 . *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2022;24(4): 496–503. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2022.24/10645>
11. Rehman F., Sayed M., Khan J. A., ... Khattak R. Degradation of crystal violet dye by Fenton and Photo-fenton oxidation processes. *Zeitschrift Fur Physikalische Chemie*. 2018;232(12); 1771–1786. <https://doi.org/10.1515/zpch-2017-1099>
12. Oliveira T. P., Rodrigues S. F., Marques G. N., ... Oliveira M. M. Synthesis, characterization, and photocatalytic investigation of CuFe_2O_4 for the degradation of dyes under visible light. *Catalysts*. 2022;12(6): 623. <https://doi.org/10.3390/catal12060623>
13. Томина, Е. В. Куркин Н. А., Конкина Д. А. Наноразмерный катализатор ZnFe_2O_4 для очистки сточных вод от красителей окислительной деструкцией. *Экология и промышленность России*. 2022;26(5); 17–21. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2022-5-17-21>
14. Chandrasekaran S., Bowen C., Zhang P., Li Z., Yuan Q., Ren X. Spinel photocatalysts for environmental remediation, hydrogen generation, CO_2 reduction and photoelectrochemical water splitting. *Journal of Materials Chemistry A*. 2018;6(24): 11078–11104. <https://doi.org/10.1039/c8ta03669a>
15. Vinuthna C. H., Kadiyala C. B., Chandra S. C., Ravinder D. Magnetic and antimicrobial properties of cobalt-zinc ferrite nanoparticles synthesized by citrate-gel method. *Applied Ceramic Technology*. 2019;16(5); 1944–1953 <https://doi.org/10.1111/ijac.13276>
16. Томина Е. В., Куркин Н. А., Дорошенко А. В. Синтез наноразмерного феррита кобальта и его каталитические свойства в фентоноподобных процессах *Неорганические материалы*. 2022;58(7);

727–732. <https://doi.org/10.31857/S0002337X22070132>

17. JCPDC PCPDFWIN: A windows retrieval/display program for accessing the ICDD PDF – 2 Data base, International Centre for Diffraction Data, 1997.

18. Brandon D., Kaplan U. *Microstructure of materials. Research and control methods*. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd; 1999. 384 p.

19. Roshanfekar R. L., Farshi G. B., Irani, M., Sa-degh S. M., Haririan, I. Comparison study of phenol degradation using cobalt ferrite nanoparticles synthesized by hydrothermal and microwave methods. *Desalination and Water Treatment*. 2015;56(12): 3393–3402. <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.977960>

20. Sharma R. Tailoring the photo-Fenton activity of spinel ferrites (MFe_2O_4) by incorporating different cations ($M = Cu, Zn, Ni$ and Co) in the structure. *RSC Advances*. 2015;5: 6006–6018. <https://doi.org/10.1039/C4RA13692F>

21. Samoila, P., Cojocaru, C., Mahu, E., Ignat, M., Harabagiu, V. Boosting catalytic wet-peroxide-oxidation performances of cobalt ferrite by doping with lanthanides for organic pollutants degradation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2021;9(1): 104961. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104961>

22. Соловьёва А.А., Немченко М.Н., Лебедева О.Е. Каталитическое окисление динитрофенолов пероксидом водорода в присутствии ионов железа(II) и (III). *Бутлеровские сообщения*. 2006;9(5): 27–32. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12965471>

23. Tatarchuk T., Shyichuk A., Trawczyńska I., Yaremii I., Pędziwiatr A. T., Kurzydło P., Bogacz B. F., Gargula R. Spinel cobalt(II) ferrite-chromites as catalysts for H_2O_2 decomposition: Synthesis, morphology, cation distribution and antistructure model of active centers formation. *Ceramics International*. 2020;46: 27517–27530. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.07.243>

24. Ying G., Weihuang Z., Jiawu L., Ping L., Jianfeng Zh., Tinglin H., Kaiqiang L. Mesoporous sulfur-doped $CoFe_2O_4$ as a new Fenton catalyst for the highly efficient pollutants removal. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2021;295: 120273. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2021.120273>

25. Чан К. А., Чан Н. Л., Ань, Д. Х. Н.... Ле Т. К. Синтез магнитных адсорбентов хромзамещенных ферритов кобальта $Co(Cr_xFe_{1-x})_2O_4$ для удаления фосфатов. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2022;24(3): 306–314. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2022.24/9852>

Информация об авторах

Томина Елена Викторовна, д. х. н., доцент, заведующий кафедрой химии, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-5222-0756>

tomina-e-v@yandex.ru

Во Куанг Май, к. х. н., доцент, Факультет естественных наук, Университет Сайгона (Хошимин, Вьетнам).

voquangmai@sgu.edu.vn

Куркин Николай Андреевич, аспирант кафедры материаловедения и индустрии наносистем, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-0468-8207>

kurkin.nik@yandex.ru

Дорошенко Алёна Владимировна, бакалавр кафедры материаловедения и индустрии наносистем, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0001-7487-5078>

al.doroschencko2016@yandex.ru

Нгуен Ань Тьен, к. х. н., доцент, заведующий кафедрой неорганической химии, Педагогический университет Хошимина (Хошимин, Вьетнам).

<https://orcid.org/0000-0002-4396-0349>

tienna@hcmue.edu.vn

Синельников Александр Алексеевич, к. ф.-м. н, директор Центра коллективного пользования научным оборудованием (Воронеж, Российская Федерация).

rnileme@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-0549-4615>

Поступила в редакцию 02.03.2023; одобрена после рецензирования 28.03.2023; принята к публикации 15.04.2023; опубликована онлайн 25.06.2023.