



Оригинальные статьи

Научная статья

УДК 54.057: 544.478: 549.731.11

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2024.26/12221>

Синтез, исследование каталитической и сорбционной активности наноразмерного феррита никеля (II) в отношении метилового оранжевого

А. А. Мещерякова^{1✉}, Е. В. Томина^{1,2}, С. А. Титов¹, Ань Тьен Нгуен³, А. И. Дмитренко²

¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный педагогический университет»,
Университетская пл., 1, Воронеж 394018, Российская Федерация

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

³Педагогический университет Хошимина,
ул. Ан Зьонг-Вьонг, 280, округ 4, район 5, Хошимин, Вьетнам

Аннотация

Наноразмерные магнитные ферриты-шпинели привлекают все большее внимание как функциональные материалы для катализа и сорбции. Преимущество таких катализаторов и сорбентов определяется их химической устойчивостью в агрессивных средах и термической стабильностью, большой площадью удельной поверхности, высокой намагниченностью насыщения, позволяющей создавать на их основе магнитоуправляемые функциональные материалы. В данной статье представляются результаты синтеза нанопорошка феррита никеля (II), его характеристики, исследования каталитической и сорбционной активности в отношении красителя метилового оранжевого.

Синтезированный методом цитратного горения нанокристаллический NiFe_2O_4 охарактеризован методами рентгеновской дифракции (РФА), просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), растровой электронной микроскопии (РЭМ). Проведено тестирование никелевой шпинели как катализатора фентоноподобной реакции окислительной деструкции метилового оранжевого при УФ-облучении с $\lambda = 270$ нм. Осуществлена дифференциация окисления с сорбцией красителя на наноразмерном катализаторе NiFe_2O_4 . Кинетика окислительной деструкции поллютанта при ультрафиолетовом облучении в присутствии катализатора удовлетворительно описывается моделью псевдопервого порядка, константа скорости реакции составляет 0.0191 мин^{-1} . Степень деструкции метилового оранжевого за 150 мин достигает 99 %. Параллельный эксперимент без добавления пероксида водорода к раствору красителя позволил оценить сорбционную способность наноразмерного феррита никеля (II). Концентрация красителя через 150 мин за счет сорбции уменьшается на 7.5 %, равновесная сорбционная емкость NiFe_2O_4 невелика и составляет 0.132 мг/г. Это свидетельствует о деколоризации раствора метилового оранжевого преимущественно за счет его каталитической окислительной деструкции по типу реакции Фентона.

Вышеизложенное позволяет рассматривать наноразмерный феррит никеля как перспективный материал для процессов очистки сточных вод путем глубокого окисления органических поллютантов.

Ключевые слова: феррит никеля, нанопорошок, фотокатализ, реакция Фентона

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

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

Для цитирования: Мещерякова А. А., Томина Е. В., Титов С. А., Нгуен А. Т., Дмитренко А. И. Синтез, исследование каталитической и сорбционной активности наноразмерного феррита никеля (II) в отношении метилового оранжевого. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2024;26(3): 456–463. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2024.26/12221>

✉ Мещерякова Анна Андреевна, e-mail: anna-meshcheryakova@internet.ru

© Мещерякова А. А., Томина Е. В., Титов С. А., Май В. К., Нгуен А. Т., Дмитренко А. И. 2024



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

For citation: Meshcheryakova A. A., Tomina E. V., Titov S. A., Nguyen A. T., Dmitrenkov A. I. Synthesis of nanoscale nickel (II) ferrite and a study of its catalytic and sorption activities towards methyl orange. *Condensed Matter and Interphases*. 2024;26(3): 456–463. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2024.26/12221>

1. Введение

В последние годы резко возрос интерес к наноразмерным ферритам со структурой шпинели как полифункциональным материалам. Преимущество наноразмерных шпинелей (MeFe_2O_4 , где $\text{Me} = \text{Zn}, \text{Ni}, \text{Mg}, \text{Co}, \text{Mn}$) как катализаторов и сорбентов определяется, в первую очередь, их химической устойчивостью в кислых средах, термической стабильностью, высокоразвитой поверхностью, высокой намагниченностью насыщения [1, 2]. Магнитные свойства ферритов открывают возможности создания на их основе магнитоуправляемых функциональных материалов, в первую очередь, катализаторов и сорбентов.

В настоящее время катализаторы на основе ферритов-шпинелей уже имеют достаточно широкий спектр областей применения, таких как окислительная дегидратация углеводов, разложение спиртов, очистка выхлопных газов автомобилей [3–6].

Ферриты-шпинели [7,8] и наноконпозиты на основе ферритов [9–11] используются в ряде технологий для очистки сточных вод от поллютантов: красителей, антибиотиков, производных фенола и т. д.

Наноразмерные катализаторы и сорбенты должны обладать не только высокой активностью вследствие развитой поверхности с большим количеством активных центров, но и быть продуктами энергоэффективных и ресурсосберегающих технологий, чтобы сделать экономически обоснованным их промышленное внедрение. Для масштабного практического использования ферритов среди множества известных методов их синтеза [12–16] необходимо выделить простые, воспроизводимые и экономичные методы, позволяющие регулировать характеристики наноразмерных ферритов-шпинелей с целью получения образцов с большим количеством активных центров для катализа и сорбции и магнитными свойствами, необходимыми и достаточными для управления внешним магнитным полем.

Цель данного исследования заключалась в синтезе наноразмерного феррита никеля (II), являющегося мягким магнитным материалом со структурой обратной шпинели, методом цитратного горения и тестировании его в качестве катализатора фентоноподобной реакции окислительной деструкции красителя метило-

вого оранжевого.

2. Экспериментальная часть

Синтез NiFe_2O_4 осуществляли методом цитратного горения согласно [17]. Фазовый состав определяли методом рентгеновской дифрактометрии (дифрактометр Empyrean B.V. с анодом Cu ($\lambda = 1.54060$ нм)). Съемку проводили в интервале углов $2\theta = 10\text{--}80^\circ$ с шагом 0.0200. Для идентификации фаз использовалась база данных JCP-DC, эталонная карточка № 54-0964 [18]. О размере и морфологии частиц делали выводы по данным просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ, просвечивающий электронный микроскоп CarlZeiss Libra-120). РЭМ изображение образца и количественный элементный анализ проводили на растровом электронном микроскопе JSM-6380LV JEOL с системой микроанализа INCA 250.

Исследование каталитической активности наноразмерного феррита никеля (II) проводили в модельной реакции окисления метилового оранжевого (МО) пероксидом водорода. Для этого готовили раствор, содержащий 0.0100 мг/мл метилового оранжевого и 10 мас. % пероксида водорода. Уровень pH раствора, равный 4.5, поддерживали ацетатным буфером. Затем в серию проб раствора объемом 15.00 мл добавляли по 0.2500 г катализатора. Аналогично проводили контрольные измерения концентраций раствора МО без катализатора.

Эксперимент проводили при ультрафиолетовом облучении с $\lambda = 270$ нм (УФ-лампа Light-Best UVC, 25 Вт). Концентрацию МО определяли методом фотоколориметрии (фотоколориметр «КФК-3-01»). Аналитическая длина волны для МО составляла 364 нм. Степень деструкции 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 каталитического окисления и сорбции красителя на наноразмерном катализаторе NiFe_2O_4 был выполнен эксперимент по вышеописанной методике в темноте без добавления в растворы окислителя H_2O_2 . В этом случае окислительная деструкция МО не

осуществлялась, а деколоризация раствора обуславливалась только сорбцией поллютанта на феррите. Время статической сорбции составляло 2.5 часа. Сорбционную емкость феррита никеля (II) определяли по уравнению (2):

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

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

3. Результаты и их обсуждение

Рефлексы на дифрактограмме синтезированного методом цитратного горения нанопорошка (рис. 1) относятся к целевой фазе $NiFe_2O_4$ (JCPDC № 54-0964). Идентифицирован одиночный рефлекс малой интенсивности оксида железа Fe_2O_3 , что не представляется критичным

вследствие потенциальной каталитической активности иона Fe^{3+} .

Средний размер областей когерентного рассеяния (ОКР) частиц $NiFe_2O_4$, рассчитанный с использованием формулы Дебая–Шеррера [19], составляет 31 ± 2 нм.

По данным ПЭМ (рис. 2.) установлено, что частицы $NiFe_2O_4$ имеют форму близкую к сферической. Наблюдаются отдельные крупные частицы размером 90–100 нм, однако преобладающая фракция частиц имеет размер в диапазоне 21–50 нм. Средний размер частиц $NiFe_2O_4$ по данным ПЭМ составляет 38 ± 3 нм. Расчетные значения ОКР по данным РФА в целом коррелируют с результатами ПЭМ.

Средние значения массовых и атомных процентов элементов Ni, Fe, O по данным энергодисперсионного анализа (табл. 1) соответствуют ожидаемому химическому составу синтезируемых образцов. Присутствие остаточного углерода на энергодисперсионном спектре (рис. 3)

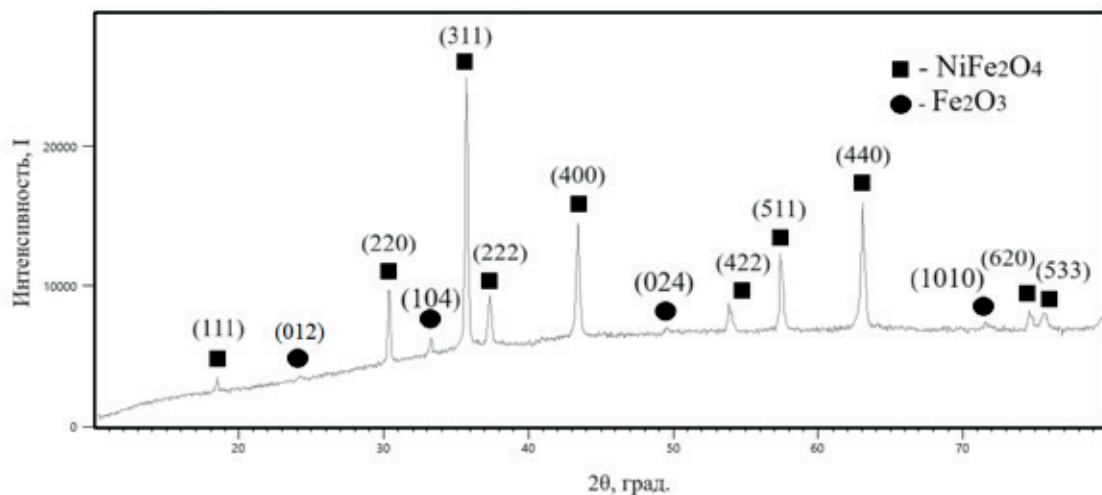


Рис. 1. Дифрактограмма нанопорошка $NiFe_2O_4$

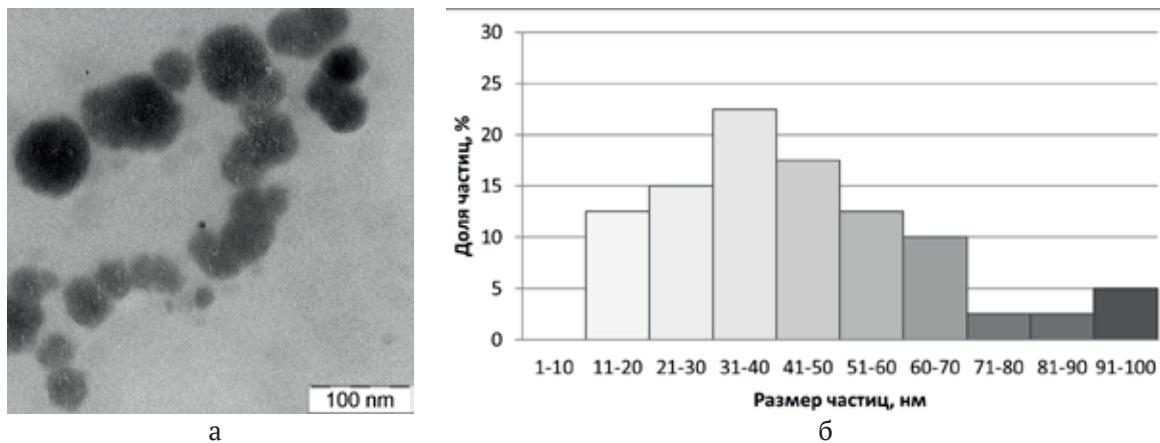


Рис. 2. ПЭМ изображение (а) и гистограмма распределения частиц $NiFe_2O_4$ по размерам (б)

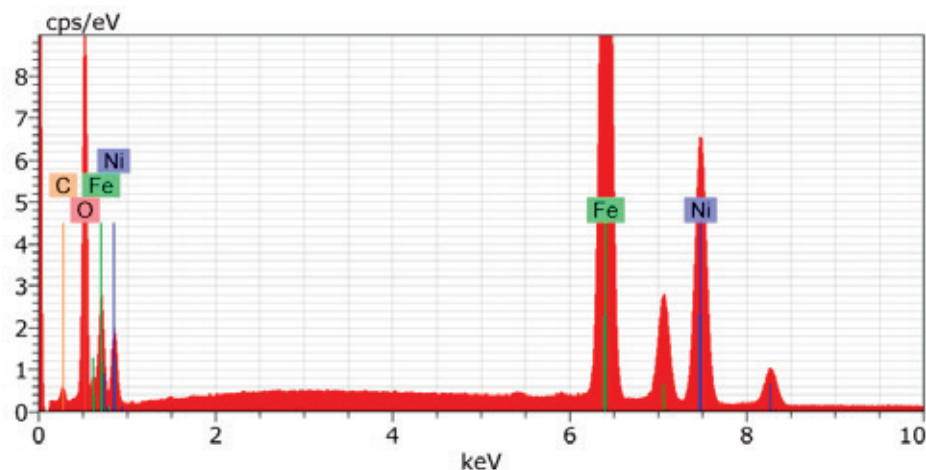


Рис. 3. Энергодисперсионный спектр NiFe₂O₄

Таблица 1. Результаты энергодисперсионного анализа нанопорошка феррита

| Элемент | Весовой % | Атомный % |
|---------|-----------|-----------|
| O | 30.50 | 55.05 |
| Fe | 40.19 | 20.78 |
| Ni | 24.21 | 11.91 |
| C | 5.10 | 12.26 |

свидетельствует о вероятном накоплении в порах нанопорошка твердых рентгеноаморфных продуктов деструкции геля без полного окисления продуктов сгорания.

Для поверхности феррита никеля (II) характерна «кораллоподобная» структура, кристаллиты имеют выраженную агломерацию (рис. 4). Опираясь на данные ПЭМ, можно предположить, что агломераты NiFe₂O₄ размером до 20 мкм образованы наночастицами размером менее 100 нм. На РЭМ изображении отчетливо дифференцируются равноосные мелкие частицы с выраженной кристаллическостью.

Достаточно высокая пористость шпинели объясняется выделением газообразных продуктов горения полимерного геля, прежде всего, оксидов углерода CO и CO₂, что является отличительной чертой наноразмерных порошков, синтезированных методом цитратного горения [20].

Экспериментально обнаружено, что синтезированный методом цитратного горения нанопорошок никелевой шпинели является эффективным гетерогенным катализатором разложения пероксида водорода по типу реакции Фентона. Окислительная деструкция МО под воздействием УФ излучения в присутствии катализатора NiFe₂O₄ протекает более интенсивно, чем в его

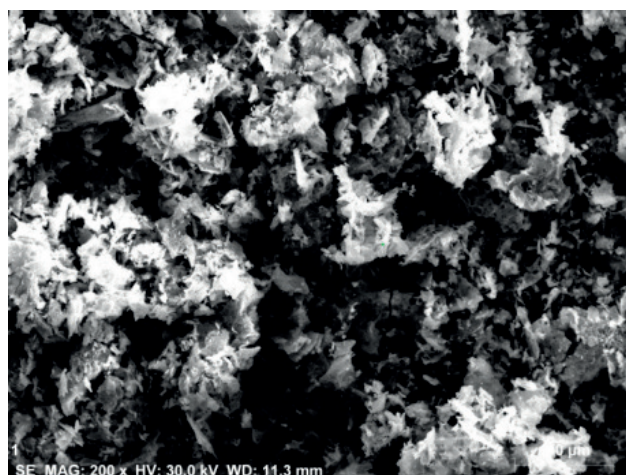


Рис. 4. РЭМ изображение нанопорошка NiFe₂O₄

отсутствии (рис. 5). Концентрация красителя при каталитическом окислении через 2.5 часа после начала реакции уменьшается в 17 раз. В отсутствие катализатора после 2.5 часов реакции концентрация МО уменьшается только в 2 раза.

Степень деструкции красителя метиленового оранжевого без катализатора при видимом освещении через 2.5 часа реакции составила 50%. В присутствии феррита никеля (II) с УФ облучением реакционной смеси степень деструкции МО возросла до 99%.

Кинетические кривые окислительной деструкции красителя по форме соответствуют псевдо-первому порядку реакции. Оценка константы скорости проводилась путем линеаризации кинетических зависимостей в логарифмических координатах (рис. 6). Константа скорости реакции окислительной деструкции МО при УФ-облучении в присутствии NiFe₂O₄ составила 0.0191 мин⁻¹. Константа скорости в от-

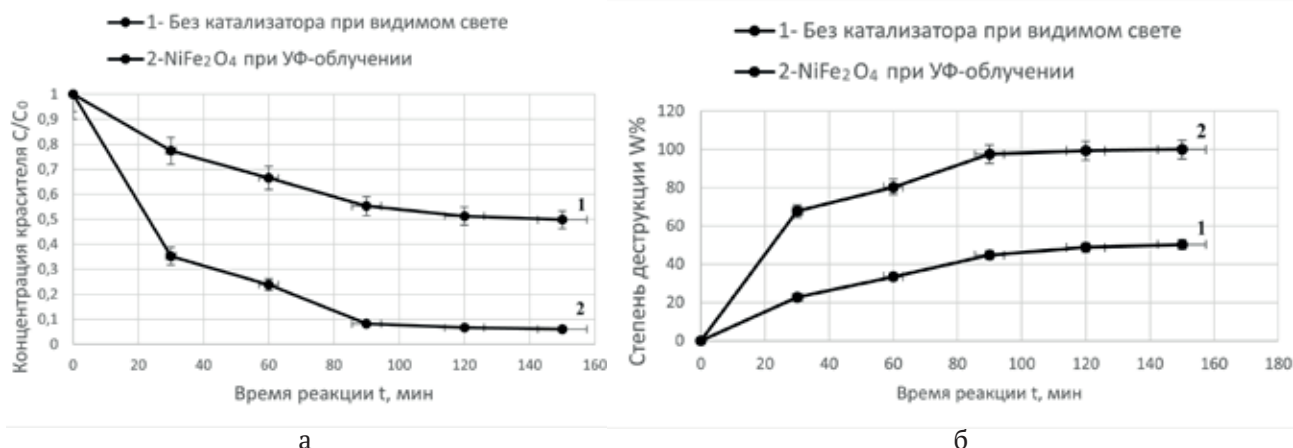


Рис. 5. Изменение концентрации (а) и степень деструкции (б) красителя МО без катализатора (1) и в присутствии $NiFe_2O_4$ при воздействии УФ-облучения (2)

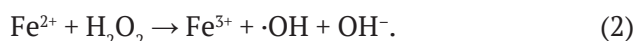
сутствии катализатора при естественном освещении практически на порядок меньше и равна 0.0044 мин^{-1} .

Осуществление процесса без окислителя H_2O_2 выявило небольшую сорбционную способность никелевой шпинели в отношении МО, концентрация красителя через 2.5 часа уменьшается на 7.5 % (рис. 7).

Сорбционная емкость $NiFe_2O_4$ достигает максимального значения 0.132 мг/г за 120 мин (рис. 7, вставка), что свидетельствует о незначительном вкладе сорбции в общий процесс декolorизации раствора МО в присутствии наноразмерного катализатора $NiFe_2O_4$.

Структура смешанной шпинели, характерная для феррита никеля (II), предполагает распределение ионов Fe^{3+} в октаэдрических и тетраэдрических пустотах. Каталитическая активность ферритов-шпинелей в Фентон-процессах обусловлена образованием с их участием активных

окислителей при разложении пероксида водорода. Авторами [21] формирование гидроксильных радикалов $\cdot OH$ связывается с активностью ионов Fe^{2+} , а за образование радикалов $\cdot OOH$ преимущественно отвечают ионы Fe^{3+} . Октаэдрические ионы Fe^{3+} восстанавливаются до степени окисления +2 решеточным кислородом [22]. Ионы Fe^{3+} в тетраэдрической позиции, проявляя электроноакцепторные свойства (реакция 1), способствуют образованию активных центров фентон-подобной реакции Fe^{2+} , на которых разложение пероксида водорода протекает с образованием гидроксильных радикалов (реакция 2):



УФ облучение вызывает регенерацию Fe^{2+} с образованием гидроксильных радикалов и молекулярного кислорода (реакции 3, 4):

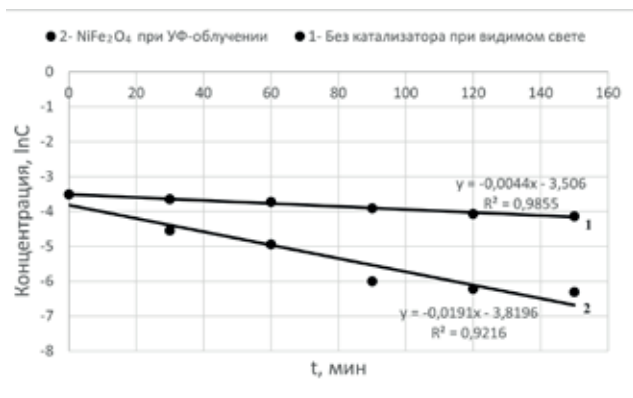


Рис. 6. Кинетические кривые окисления МО пероксидом водорода в координатах $\ln C - t$ без катализатора (1) и в присутствии катализатора $NiFe_2O_4$ (2)

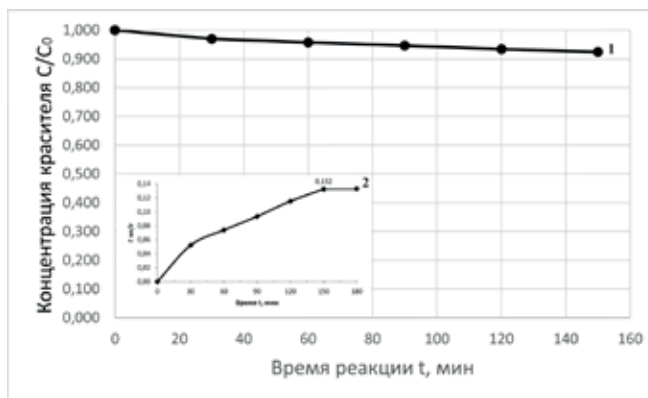
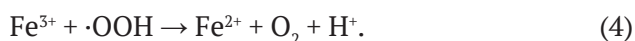
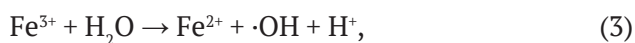
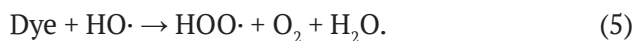


Рис. 7. Кривые сорбции МО в присутствии $NiFe_2O_4$ (1) и сорбционной емкости феррита (2)



Радикалы-окислители окисляют молекулу красителя в соответствии с уравнением (5):



Ранее нами в аналогичных условиях для наноразмерного CoFe_2O_4 со структурой обратной шпинели как катализатора фентоноподобного окисления метилового оранжевого установлена константа скорости 0.0354 мин^{-1} [23]. Вероятно, пара $\text{Co}^{2+}/\text{Co}^{3+}$ в решетке шпинели увеличивает каталитическую активность феррита кобальта в сравнении с NiFe_2O_4 за счет ускоренного переноса электронов. Ионы кобальта Co^{2+} располагаются в центре кислородных октаэдров, и электроны ионов кислорода легко могут участвовать в окислении H_2O_2 с образованием гидроксил-радикалов и переходом кобальта в степень окисления +3. Вероятность участия ионов никеля в силу преимущественной степени окисления +2 в подобном процессе гораздо ниже, тем не менее, в [24] методом РФЭС подтверждено присутствие ионов Ni^{3+} в никелевой шпинели после озонирования щавелевой кислоты. Однако необходимо подчеркнуть, что значение константы скорости окисления МО в присутствии NiFe_2O_4 превышает таковое для окислительной деструкции МО в похожих условиях в присутствии в качестве катализатора наноразмерной нормальной шпинели ZnFe_2O_4 (0.010 мин^{-1}), где катион А также имеет одну степень окисления +2, несмотря на достаточно высокую удельную поверхность катализатора $453.1 \text{ м}^2/\text{г}$ [25]. Это согласуется с данными [24] о плохой способности ZnFe_2O_4 к переносу электронов с переходом катиона А в состояние Zn^{3+} .

4. Заключение

Методом цитратного горения синтезирован наноразмерный феррит никеля со структурой шпинели (данные РФА) со средним размером частиц $38 \pm 3 \text{ нм}$ (данные ПЭМ). Установлена высокая каталитическая активность нанодисперсного NiFe_2O_4 в фентоноподобной реакции окисления красителя метилового оранжевого. При оптимизированных условиях и эффективном контроле параметров, включая время контакта, pH раствора, дозу катализатора и дополнительного УФ облучения удаляется более 99 % загрязняющего вещества. Степень окислительной деструкции красителя без катализатора со-

ставляет 50 %. Константа скорости реакции окислительной деструкции МО при УФ облучении в присутствии феррита никеля (II) составила 0.0191 мин^{-1} , в отсутствие катализатора при естественном освещении была равна 0.0044 мин^{-1} . Сорбционная емкость NiFe_2O_4 достигает максимального значения 0.132 мг/г за 120 мин, а значит сорбция вносит незначительный вклад в декolorизацию раствора МО в целом.

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

- Gagan K. B., Sumit B., Mahavir S., Khalid M. B. *Ferrites and multiferroics fundamentals to applications: fundamentals to applications*. Springer Singapore; 2021. 213 p. <https://doi.org/10.1007/978-981-16-7454-9>
- Sharma S. K. (ed). *Spinel nano ferrites. Synthesis, properties and applications*. Springer Cham; 2021. 475 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-79960-1>
- Winiarska K., Klimkiewicz R., Tylus W., ... Szczygieł I. Study of the catalytic activity and surface properties of manganese-zinc ferrite prepared from used batteries. *Journal of Chemistry*. 2019;201: 1–14. <https://doi.org/10.1155/2019/5430904>
- Ramazania A., Fardood S. T., Hosseinzadeha Z., ... Jooc S. W. Green synthesis of magnetic copper ferrite nanoparticles using tragacanth gum as a biotemplate and their catalytic activity for the oxidation of alcohols. *Iranian Journal of Catalysis*. 2017;7(3): 181–185.
- Taghavi Fardood S., Ramazani A., Golfar Z., Joo S. W. Green synthesis of $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (hematite) nanoparticles using tragacanth gel. *Quarterly Journal of Applied Chemical Research*. 2017;11(3): 19–27.
- Thomas J., Thomas N., Girgsdies F., Beherns M., Huang X., Sudheesh V. D. Synthesis of cobalt ferrite nanoparticles by constant pH co-precipitation and their high catalytic activity in CO oxidation. *New Journal of Chemistry*. 2017;41: 7356–736. <https://doi.org/10.1039/C7NJ00558J>
- Зеленская Е. А., Чернышев В. М., Шабельская Н. П., ... Власенко А. И. Изучение каталитической активности оксидов переходных элементов в реакции разложения пероксида водорода. *Фундаментальные исследования*. 2016;4: 261–265.
- 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>
9. Ding C., Zhao H., Zhu X., Liu X. Preparation of cotton linters' aerogel-based C/NiFe₂O₄ photocatalyst for efficient degradation of methylene blue. *Nanomaterials*. 2022;12(12): 2021. <https://doi.org/10.3390/nano12122021>
10. Goma H., Abd El-Monaem E. M., Eltaweil A. S., Omer A. M. Efficient removal of noxious methylene blue and crystal violet dyes at neutral conditions by reusable montmorillonite/NiFe₂O₄@amine-functionalized chitosan composite. *Scientific Reports*. 2022;15;12(1): 15499. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-19570-1>
11. Tomina E., Novikova L., Kotova A., ... Alekhina Y. ZnFe₂O₄/zeolite nanocomposites for sorption extraction of Cu²⁺ from aqueous medium. *Applied Chemistry*. 2023;(3):452–476. <https://doi.org/10.3390/applied-chem3040029>
12. Rashidi S., Ataie A. One-step synthesis of CoFe₂O₄ nano-particles by mechanical alloying. *Advanced Materials Research*. 2014;829: 747–751. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.829.747>
13. Srinivasa Rao K., Ranga Nayakulu S. V., Chaitanya Varma M., Choudary G. S. V. R. K., Rao K. H. Controlled phase evolution and the occurrence of single domain Co₂Fe₂O₄ 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>
14. Manikandan A., Sridhar R., Arul Antony S., Ramakrishna S. A simple aloe vera plant-extracted microwave and conventional combustion synthesis: morphological, optical, magnetic and catalytic properties of CoFe₂O₄ nanostructures. *Journal of Molecular Structure*. 2014;1076: 188–200. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2014.07.054>
15. 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>
16. Миттова И. Я., Томина Е. В., Лаврушина С. С. *Наноматериалы: синтез нанокристаллических порошков и получение компактных нанокристаллических материалов*. Учебное пособие для вузов. Воронеж: Издательство: ИПЦ ВГУ; 2007.
17. Meshcheryakova A. A., Tomina E. V., Titov S. A. Study of the sorption and catalytic properties of nickel ferrite with respect to 2,4-dinitrophenol. *High Energy Chemistry*. 2023;57: 342–345. <https://doi.org/10.1134/S0018143923080180>
18. JCPDC PCPDFWIN: A Windows Retrieval/Display program for Accessing the ICDD PDF – 2 Data base. International Centre for Diffraction Data, 1997.
19. Brandon D., Kaplan U. *Microstructure of materials. Research and control methods*. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd; 1999, p. 384.
20. Томина, Е. В. Куркин Н. А., Конкина Д. А. Наноразмерный катализатор ZnFe₂O₄ 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>
21. Maldonado A. C. M., Winkler E. L., Raineri M., ... Lima E. Free-radical formation by the peroxidase-like catalytic activity of MeFe₂O₄ (M = Fe, Ni, and Mn) nanoparticles. *The Journal of Physical Chemistry C*. 2019;123(33): 20617–20627. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.9b05371>
22. Tatarchuk T., Shyichuk A., Trawczyńska I., ... Gargula R. Spinel cobalt(II) ferrite-chromites as catalysts for H₂O₂ decomposition: synthesis, morphology, cation distribution and antistructure model of active centers formation. *Ceramics International*. 2020;46(17): 27517–27530. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.07.243>
23. Куркин Н. А., Волков А. С., Дорошенко А. В., Гудкова Н. А., Томина Е. В. *Актуальные проблемы теории и практики гетерогенных катализаторов и адсорбентов: материалы VII Всероссийской научной конференции*. Казань; 2023. с. 248–249.
24. Zhang F., Wu C., Kaiyi W., Zhou H., ... Wei S. Ozonation of aqueous phenol catalyzed by biochar produced from sludge obtained in the treatment of coking wastewater. *Journal of Environmental Management*. 2017;547: 60–68. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.07.038>
25. Shabelskaya N. P., Egorova M. A., Vasileva E. V., Polozhentsev O. E. Photocatalytic properties of nano-sized zinc ferrite and zinc chromite. *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*. 2021;12(1): 015004. <https://doi.org/10.1088/2043-6254/abde3b>

Информация об авторах

Мещерякова Анна Андреевна, аспирант кафедры материаловедения и индустрии наносистем, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0003-4899-609X>
anna-meshcheryakova@internet.ru

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

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

<https://orcid.org/0000-0003-3919-8571>
tienna@hcmue.edu.vn

Дмитренко Александр Иванович, к. т. н., доцент, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0001-9296-1762>
dmitrenkov2109@mail.ru

Поступила в редакцию 26.03.2024; одобрена после рецензирования 22.04.2024; принята к публикации 15.05.2024; опубликована онлайн 01.10.2024.