

ХИМИЯ

УДК 546

DOI 10.55421/3034-4689_2026_29_6_5

Е. А. Зеленская, Н. Г. Сундукова, А. В. Вяльцев,
Н. П. Шабельская**ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ФЕРРИТА МЕДИ (II)
НА ПОВЕРХНОСТИ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩЕГО МАТЕРИАЛА***Ключевые слова: кокс, феррит меди, структура шпинели, образование композиционного материала.*

Оксидные гетерогенные катализаторы на основе ферритов-шпинелей с общей формулой MFe_2O_4 , могут эффективно решать ряд важных проблем. Среди них выделяется феррит меди (II) ($CuFe_2O_4$) - соединение, обладающее высокой химической стабильностью и каталитическими характеристиками, что делает его идеальным гетерогенным катализатором для ряда процессов. В представленном исследовании проведено изучение возможности формирования композиционного материала на основе феррита меди (II) и углеродного носителя, в качестве которого использован активированный уголь из скорлупы кокоса, кокс производства филиала ПАО «Акционерная нефтяная Компания «Башнефть». Полученные материалы охарактеризованы методами рентгенофазового анализа, сканирующей электронной микроскопии. Показано, что формирование оксидной составляющей на поверхности углеродного носителя протекает по поверхности зерен. Полученные оксидные материалы имели структуру кубической шпинели. Установлено, что наиболее характерным размером частиц активированного угля является 0,5-1,0 мм, для кокса – фракция 0,02-0,05 мм. Выявлена корреляция значения удельной площади поверхности носителя и количества образовавшегося композиционного материала: для носителя с минимальным значением удельной площади поверхности отмечен наибольший процент формирования магнитного композита. Высказано предположение, что увеличение площади поверхности композитов может быть связано с формированием на подложке различных по толщине пленок оксидных материалов, при этом сами оксидные соединения имеют развитую поверхность. Полученные результаты открывают новые возможности поиска технологических факторов управления размерными характеристиками и, как следствие, структурно чувствительными свойствами оксидных соединений и композиционных материалов на их основе.

Е. А. Zelenskaya, N. G. Sundukova, A. V. Vyaltsev,
N. P. Shabelskaya**FEATURES OF THE FORMATION OF COPPER (II) FERRITE ON THE SURFACE
OF A CARBON-CONTAINING MATERIAL***Keywords: coke, copper ferrite, spinel structure, composite material formation.*

Heterogeneous oxide catalysts based on spinel ferrites with the general formula MFe_2O_4 can effectively solve a number of important problems. Among them, copper (II) ferrite ($CuFe_2O_4$) stands out, a compound with high chemical stability and catalytic characteristics, which makes it an ideal heterogeneous catalyst for a number of processes. In the presented study, the possibility of forming a composite material based on copper (II) ferrite and a carbon carrier was studied, which used activated carbon from coconut shells, coke produced by a branch of PJSC Bashneft Joint Stock Oil Company. The obtained materials were characterized by X-ray phase analysis and scanning electron microscopy. It is shown that the formation of the oxide component on the surface of the carbon carrier proceeds along the surface of the grains. The resulting oxide materials had a cubic spinel structure. It was found that the most characteristic particle size of activated carbon is 0.5-1.0 mm, for coke – A fraction of 0.02-0.05 mm. Revealed a correlation between the value of the specific surface area of the carrier and the amount of composite material formed: for a carrier with a minimum value of the specific surface area, the highest percentage of magnetic composite formation was noted. It was suggested that an increase in the surface area of composites may be associated with the formation of oxide materials of various thicknesses on the substrate, while the oxide compounds themselves have a developed surface. The results obtained open up new possibilities for searching for technological factors for controlling the dimensional characteristics and, as a result, the structurally sensitive properties of oxide compounds and composite materials based on them.

Введение

В последние годы отмечен стремительный экономический прогресс, который сопровождается энергетическими кризисами и экологическими проблемами. Использование природных ресурсов, в том числе – биомассы, являющейся единственным возобновляемым источником углерода в природе, постепенно становится тенденцией развития

общества [1]. Достаточно часто углерод содержащие отходы [2, 3] используют в качестве сырья в промышленном производстве. Основное внимание сосредоточивается на разработке гетерогенных катализаторов промышленно значимых процессов. Например, были разработаны твердые кислотные катализаторы, такие как цеолит [4] и ионообменная смола [5], однако они имеют такие недостатки, как высокая стоимость, низкая селективность и

ограниченные условия применения. Эти проблемы могут быть решены эффективным сочетанием каталитически активных материалов с инертным носителем [6].

С другой стороны, наноматериалы произвели революцию почти во всех областях науки и технологий. Благодаря своим наноразмерным размерам и форме наноматериалы обладают отличительными свойствами по сравнению с объёмными аналогами, главным образом благодаря электронным взаимодействиям, квантовым эффектам и высоким соотношениям поверхность : объём [7]. Основным недостатком подобных систем является сложность фиксирования и стабильности во времени наноразмерных структур. Недавние исследования показали, что рациональное проектирование поверхности раздела является эффективной стратегией для улучшения большого ряда каталитических характеристик. Например, в исследовании [8] сообщают о создании нанокомпозит CuFe_2O_4 /порфирин с использованием метода самосборки, в котором органический порфириновый сенсибилизатор способствовал улавливанию света и облегчал межфазное разделение зарядов, что привело к заметному улучшению фотоэлектрохимического расщепления воды. Аналогично, в работе [9] сообщили о гибриде CuFe_2O_4 @Ni-MOF, в котором синергетическое взаимодействие между ферритом со структурой шпинели и MOF-каркасами обеспечивает обилие активных центров и ускоренный перенос заряда, что приводит к повышению эффективности выделения водорода и превосходной стабильности циклирования. Помимо получения водорода, в исследовании [10] разработали допированную Ag систему $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{CuFe}_2\text{O}_4$ Z-схемы для восстановления CO_2 под действием видимого света, в которой плазмонные наночастицы Ag действуют как электронные посредники и усилители света, обеспечивая избирательное превращение CO_2 в продукты, обогащенные кислородом [11].

Оксидные гетерогенные катализаторы на основе ферритов-шпинелей MFe_2O_4 , где $\text{M} = \text{Cu}, \text{Co}, \text{Zn}$ и т.д. могут эффективно решать ряд важных проблем. Эти катализаторы не только расширяют диапазон применения pH, но и позволяют организовать их повторное использование [12, 13]. Среди них выделяется феррит меди (II) (CuFe_2O_4) - соединение, обладающее высокой химической стабильностью и каталитическими характеристиками [14], что делает его идеальным гетерогенным катализатором для ряда процессов. Его высокая каталитическая активность, в частности, в процессе Фентона [15, 16], обусловлена синергетическим циклом между редокс-парами $\text{Cu}^{2+}/\text{Cu}^{+}$ и $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$, которые способствуют непрерывному образованию гидроксильных радикалов ($\cdot\text{OH}$) [12, 18]. Так, в работе [19] показано, что скорость разрушения красителя метиленового синего в гетерогенной системе Фентона $\text{CuFe}_2\text{O}_4/\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{CH}_3\text{COOH}/\text{H}_2\text{O}_2$ была в шесть раз выше, чем в системе $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{CH}_3\text{COOH}/\text{H}_2\text{O}_2$. В исследовании [20] подготовили новый тип CuFe_2O_4 в виде полый сферы, покрытой графитовым

углеродом, и исследовали её эффективность в фото-фентонской реакции деструкции красителя из водного раствора. Показано, что полнота удаления красителя составила 97 %, а большая удельная площадь поверхности, обеспечиваемая полыми сферами, была важным фактором для улучшения фотокаталитической активности.

Одним из основных методов синтеза композиционных материалов, содержащих оксидную и углерод содержащую составляющие, является золь-гель процесс [12, 21].

Учитывая сказанное выше, в данном исследовании было поставлено целью синтезировать сложные окси-соединения меди (II)-железа (III) на поверхности ряда углеродных носителей и изучить зависимость процесса формирования неорганического оксидного материала от морфологических и размерных характеристик углерод содержащего вещества.

Экспериментальная часть

Оксидные соединения на основе феррита меди (II) были получены по методике, разработанной авторами и описанной в работе [22]. В основе технологии приготовления образцов лежал золь-гель синтез. Кристаллогидраты азотнокислых солей меди (II), железа (III) квалификации чда были использованы для приготовления 1 моль/л растворов. В качестве осадителя применяли водный раствор аммиака. В качестве структурообразующего компонента использовали лимонную кислоту. Смесь нагревали до образования сухого остатка и далее подвергали термообработке до полного разложения органической составляющей.

Углеродсодержащей матрицей, выступающей в качестве носителя оксидной составляющей, выступали: активированный уголь из скорлупы кокоса (обозначен далее А), кокс производства филиала ПАО «Акцииерная нефтяная Компания «Башнефть» марки Б ТУ 0258-004-05766540-2008 Ново-Уфимского нефтеперерабатывающего завода (НПЗ) Новоойл (обозначен Н), Черниковского НПЗ Уфанефтехим (обозначен У).

Для получения композиционного органо-неорганического материала в реакционный сосуд вносили 10 г углеродсодержащего материала, затем – растворы исходных веществ в последовательности: растворы нитратов переходных элементов (10 мл двухвалентного элемента и 20 мл трехвалентного металла), раствор аммиака (15 мл 25 %-ного раствора), раствор лимонной кислоты (10 мл 6 моль/л раствора) и нагревали до полной деструкции образующегося при термообработке геля.

Были получены композиционные материалы $\text{CuFe}_2\text{O}_4/\text{A}$, $\text{CuFe}_2\text{O}_4/\text{H}$, $\text{CuFe}_2\text{O}_4/\text{Y}$, обозначенные далее как образец 1, 2, 3 соответственно.

Структурно-фазовый анализ образца проводили с помощью дифрактометра ARL X'TRA, оснащенного излучением $\text{Cu K}\alpha$. Для сбора данных в формате 2θ от 10° до 70° с шагом $0,02^\circ$ использовали непрерывный режим,

Анализ размерных эффектов проводили методом BET на аппарате ChemiSorb 2750.

Микрофотографии образцов получали на растровом микроскопе Quattro S SEM (ThermoFisherScientific).

После проведения реакции образцы охлаждали, взвешивали, разделяли при помощи постоянного магнита на магнитную и не магнитную фракции. За количество магнитного композиционного материала ω , % (масс.) принимали количество образца, рассчитанное по формуле:

$$\omega = (m_{\text{общ}} - m_{\text{М}}) \cdot 100 / m_{\text{общ}},$$

где $m_{\text{общ}}$ – масса образовавшегося в ходе реакции материала, г, $m_{\text{М}}$ – масса магнитной фракции, г.

Результаты и обсуждение

При формировании композиционного материала наблюдали типичную картину синтеза по золь-гель методу: сначала образовывался осадок гидроксидов, затем он растворялся в кислоте, при повышении температуры формировался пористый твердый гель, который затем разрушался с образованием конечного продукта.

Все изученные образцы представляли собой пористые порошки черного цвета. На рис. 1 в качестве примера приведена рентгенограмма образца 1. Она представлена рефлексами, характерными для феррита меди (II) (PDF Number 010-74-8585), параметр элементарной ячейки $a = 0.8373$ нм; со структурой кубической шпинели.

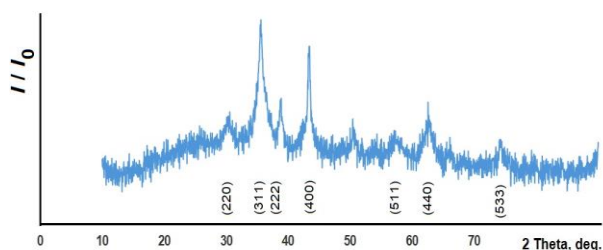


Рис. 1 - Рентгенограмма образца 1 (феррит меди (II) / А)

Fig. 1 - X-ray diffraction pattern of sample 1 (copper(II) ferrite / A)

На рис. 2 приведено распределение углеродных материалов по размеру частиц.

На рис. 3 приведены микрофотографии углеродсодержащих носителей: А (рис. 3а), Н (рис. 3б), У (рис. 3в). В табл. 1 приведена характеристика углеродных носителей и синтезированных композиционных материалов.

Наиболее характерным размером частиц носителя А является 0,5-1,0 мм, для носителей Н и У – фракция 0,02-0,05 мм. Можно предположить, что формирование оксидной составляющей на поверхности углеродного носителя протекает по поверхности зерен. Вероятно, с этим связан низкий процент образования магнитного композиционного материала в случае образца 1 (меньше в 3,5 – 4,2 раза, чем для образцов 3 и 2 соответственно).

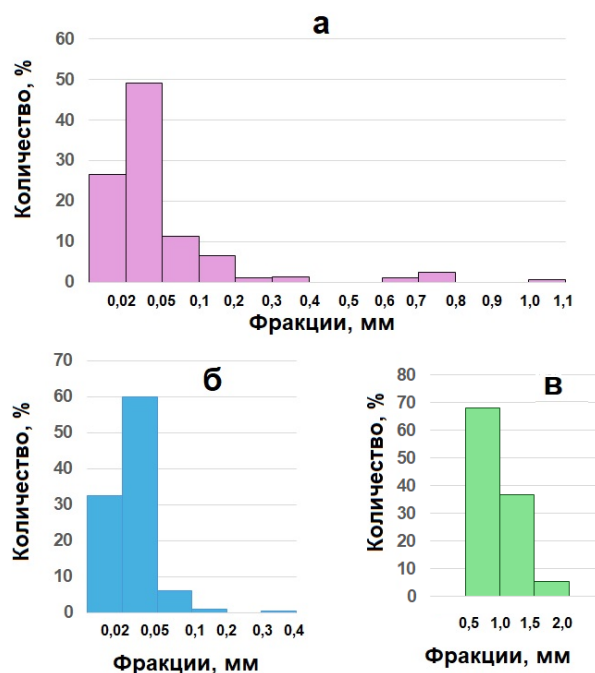


Рис. 2 - Распределение по размеру частиц: а) активированный уголь (А); б) кокс (Н); в) кокс (У)

Fig. 2 - Particle size distribution: a) activated carbon (A); b) coke (H); c) coke (U)

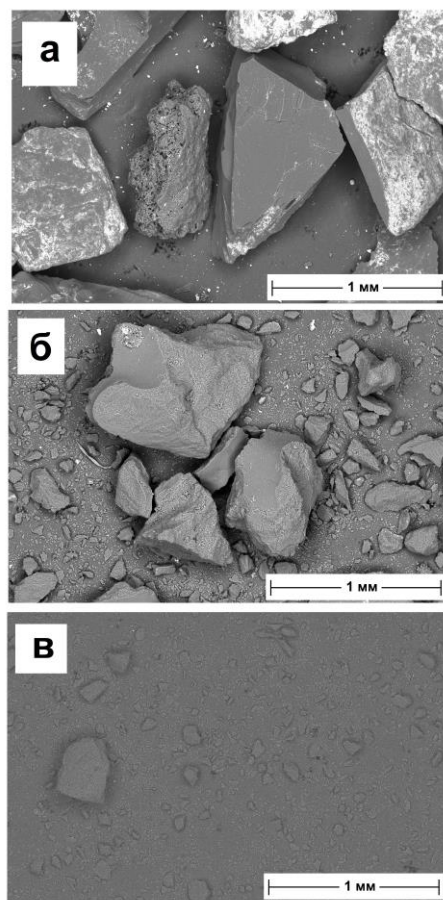


Рис. 3 - СЭМ изображения углеродных носителей: а) активированный уголь (А); б) кокс (Н); в) кокс (У)

Fig. 3 - SEM images of carbon carriers: activated carbon (A); b) coke (H); c) coke (U)

Таблица 1 - Характеристика носителя и композиционных материалов**Table 1 - Characteristics of the substrate and composite materials**

Носитель	$S_{\text{ВЕТ}}, \text{м}^2/\text{г}$		$\omega, \%$
	Носитель	Композит	
А	192,3	401,6	14,5
Н	0,4	8,9	61,4
У	0,5	17,5	50,0

Интересным экспериментальным фактом является выявленная корреляция значения удельной площади поверхности носителя и количества образовавшегося композиционного материала: для носителя Н (у которого значение удельной площади поверхности было минимальным), отмечено наибольший процент формирования магнитного композита; и наоборот, для носителя А с максимально развитой поверхностью количество магнитной фазы оказалось минимальным. Полученный результат может быть связан с возникновением затруднений в проникновении раствора в поры носителя, вследствие чего основной процесс образования оксидной фазы протекает на легко доступных внешних участках углеродного материала.

В пользу этого предположения выступает тот факт, что во всех случаях удельная площадь поверхности композиционных материалов оказывалась больше, чем у исходных носителей. Этот результат может быть обусловлен следующим обстоятельством. Размер молекулы азота составляет 0,142 нм, размер элементарной ячейки феррита меди (II) – больше примерно в 5 раз, около 0,8 нм. Следовательно, часть поверхности материалов, доступная для адсорбции молекул азота, становится не доступной для оксидного материала. В том случае, когда, как в методе ВЕТ, ферриты покрывали углеродный носитель монослоем, площадь поверхности композита должна была быть меньше площади поверхности исходного углеродного вещества. Увеличение площади поверхности композитов может быть связано с формированием на подложке различных по толщине пленок оксидных материалов, при этом сами оксидные соединения имеют развитую поверхность. На рис. 4 приведены микрофотографии композиционных материалов. На представленных микрофотографиях композиционных материалов видно, что формируются пористые структуры с развитой поверхностью.

Полученные результаты открывают новые возможности поиска технологических факторов управления размерными характеристиками и, как следствие, структурно чувствительными свойствами оксидных соединений и композиционных материалов на их основе.

Выводы

1. Проведено изучение возможности формирования композиционного материала на

основе феррита меди (II) и углеродного носителя, в качестве которого использован активированный уголь из скорлупы кокоса, кокс производства филиала ПАО «Акцииерная нефтяная Компания «Башнефть» Ново-Уфимского нефтеперерабатывающего завода (НПЗ), Черниковского НПЗ.

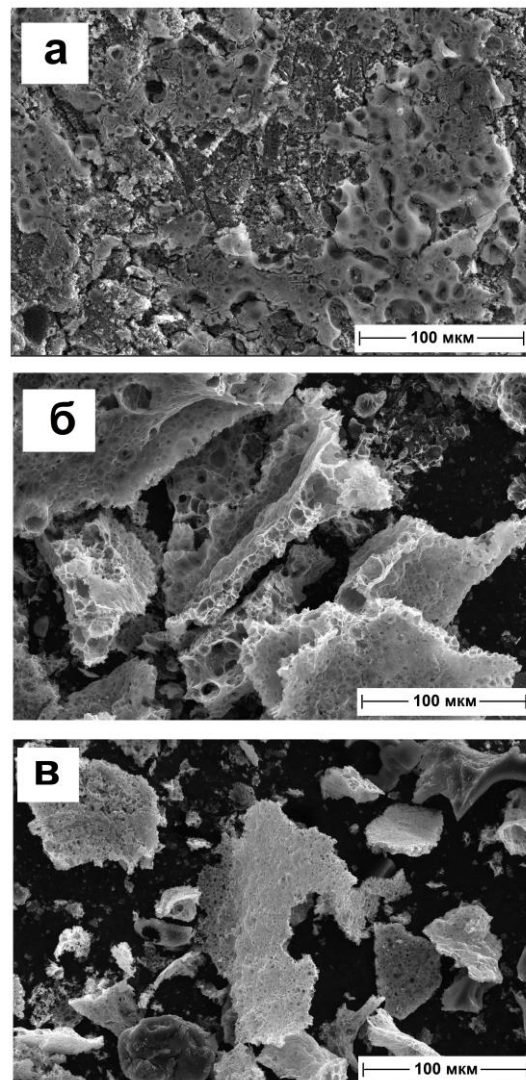


Рис. 4 - СЭМ изображения синтезированных композиционных материалов на основе феррита меди (II) с углеродным носителем: а) А; б) Н; в) У

Fig. 4 - SEM images of synthesized composite materials based on copper(II) ferrite with a carbon support: a) A; b) H; c) U

2. Показано, что формирование оксидной составляющей на поверхности углеродного носителя протекает по поверхности зерен.

3. Выявлена корреляция значения удельной площади поверхности носителя и количества образовавшегося композиционного материала: для носителя с минимальным значением удельной площади поверхности отмечен наибольший процент формирования магнитного композита.

4. Высказано предположение, что увеличение площади поверхности композитов может быть связано с формированием на подложке различных

по толщине пленок оксидных материалов, при этом сами оксидные соединения имеют развитую поверхность.

5. Полученные результаты открывают новые возможности поиска технологических факторов управления размерными характеристиками и, как следствие, структурно чувствительными свойствами оксидных соединений и композиционных материалов на их основе.

Благодарности

Исследование выполнено при финансировании Проекта Министерства науки и высшего образования РФ по поддержке молодежной лаборатории в рамках межрегионального НОЦ Юга России (FENW-2024-0001).

Авторы выражают благодарность сотруднику центра коллективного пользования «Нанотехнологии» Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова к.т.н. Яценко А.Н. за помощь в съемке и расшифровке данных РФА.

Авторы выражают благодарность руководителю центра коллективного пользования УдмФИЦ УрО РАН «Центр физических и физико-химических методов анализа, исследования свойств и характеристик поверхности, наноструктур, материалов и изделий» к.ф.-м.н. Валееву Р.Г. за помощь в проведении микроскопических исследований композиционных материалов.

Литература

1. Y. Li, B. Guan, J. Guo, Y. Chen, Z. Ma, Z. Zhuang, C. Zhu, H. Dang, L. Chen, K. Shu, K. Shi, Z. Guo, C. Yi, J. Hu, X. Hu, Z. Huang, *J. Clean. Prod.*, **450**, 141849, (2024), <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141849>.
2. M.S. Naga Sai, D. De, B. Satyavathi, *J. Clean. Prod.*, **327**, 129467, (2021), DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.129467.
3. Z. Yue, L.L. Sun, S.N. Sun, X.F. Cao, J.L. Wen, M.Q. Zhu, *Carbohydr. Polym.*, **288**, 119420, (2022), DOI: 10.1016/j.carbpol.2022.119420.
4. R. Otomo, T. Tatsumi, T. Yokoi, *Catal. Sci. Technol.*, **5**, 4001-4007, (2015), DOI: 10.1039/C5CY00719D.
5. M. Zuo, X. Zheng, W. Che, K. Wang, Y. Chen, X.i Zeng, *Separat. Purif. Technol.*, **362** (3), 131904, (2025), <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.131904>.
6. W. Zou, L. Yang, Z. Duan, J. Wang, S. Zhou, D. Yin, Q. Xu, X. Liu, *Molec. Cat.*, **578**, 114996, (2025), <https://doi.org/10.1016/j.mcat.2025.114996>.
7. S. Bedoya, D. González-Vera, E. Leal-Villarroel, F. Gracia, M.E. Domine, G.Pecchi, C.C. Torres, C.H. Campos, *Inorg. Chem. Commun.*, **182** (3), 115559, (2025), <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2025.115559>.
8. C. Van Tran, T.-D. Dang, V.D. Lai, G. Thi Nguyen, B. Thi Hoa, H.T. Nguyen, H.P.N. Thi, T.T. Nguyen, D.D. La, *Fuel*, **380**, 133196, (2025), DOI: 10.1016/j.fuel.2024.133196.
9. M.A.A. El-Khair, A.G. Al-Gamal, K.I. Kabel, W.S. Gado, A.S. Morshedy *Int. J. Hydrog. Energy*, **101**, 280-294, (2025), DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.12.449
10. I. Othman, S. Al Jitan, F. Banat, G. Palmisano, M. Abu Haija, *Mat. Today Nano*, **33**, 100719, (2026), DOI: 10.1016/j.mtnano.2025.100719.
11. F. Alheibshy, A. Alkhafaji, D.J. Jasim, P.K. Singh, Y.M. Fahmy, M. Karimov, I. Mahariq, A. Abduvokhidov, S. Usanov, R.A. Haggam, *J. Water Proc. Eng.*, **87**, 110113, (2026), <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2026.110113>.
12. J. Ai, Y. Shuai, M. Hu, L. Cheng, S. Luo, W. Li, Z. Chen, L. Hu, Z. Zhou, *Ceram. Int.*, **49**, 22941-22951, (2023), <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.04.119>.
13. Y. Cheng, S. Zhang, Z. Wang, B. Wang, J. You, R. Guo, H. Zhang, *Sep. Purif. Technol.*, **318**, 123971, (2023), <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.123971>.
14. A. Akbar, B.L.M.A. Howlader, A.V.Q. Arif Islam, T. Chatterjee, M. Ghosh, *J. Water Process Eng.*, **79**, 108871, (2025), 10.1016/j.jwpe.2025.108871.
15. E.D.N. Silva, I.L.O. Brasileiro, V.S. Madeira, B.A. de Farias, M.L.A. Ramalho, E. Rodríguez-Aguado, E. Rodríguez-Castellón, *J. Environ. Chem. Eng.*, **8**, 104132, (2020), <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104132>.
16. X. Guo, K. Wang, Y. Xu, *Mater. Sci. Eng., B*, **245**, 75-84, (2019), <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2019.05.015>.
17. J. Wen, Y. Long, L. Zhu, L. Zeng, X. Qin, S. Song, M. Lu, L. Deng, *Environ. Res.*, **275**, 121413, (2025), <https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.121413>.
18. X. Wei, J. Zang, P. Chen, Z. Wang, S. Wang, Y. Zhao, Z. Fang, *J. Water Process Eng.*, **71**, 107436, (2025), <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.107436>.
19. V. Vasudevan, B. Pei, W. Xiong, J. He, S. Li, D. Huang, X. Liao, J. Lin, *J. Environ. Chem. Eng.*, **12**, 114813, (2024), <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.114813>.
20. X. Guo, K. Wang, D. Li, J. Qin, *Appl. Surf. Sci.*, **420**, 792-801, (2017), <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.05.178>.
21. S.X. Yin, S. Jiang, R. Chen, B. Chen, W. Xie, D. Li, *Inorg. Chem. Commun.*, **183** (2), 115931, (2026), <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2025.115931>.
22. Shabelskaya N., Sulima S., Sulima E., Medennikov O., Kulikova M., Kolesnikova T., Sushkova S. *Gels*, **9**, (3), 217, (2023), DOI: 10.3390/gels9030217.

References

1. Y. Li, B. Guan, J. Guo, Y. Chen, Z. Ma, Z. Zhuang, C. Zhu, H. Dang, L. Chen, K. Shu, K. Shi, Z. Guo, C. Yi, J. Hu, X. Hu, Z. Huang, *J. Clean. Prod.*, **450**, 141849, (2024), <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141849>.
2. M.S. Naga Sai, D. De, B. Satyavathi, *J. Clean. Prod.*, **327**, 129467, (2021), DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.129467.
3. Z. Yue, L.L. Sun, S.N. Sun, X.F. Cao, J.L. Wen, M.Q. Zhu, *Carbohydr. Polym.*, **288**, 119420, (2022), DOI: 10.1016/j.carbpol.2022.119420.
4. R. Otomo, T. Tatsumi, T. Yokoi, *Catal. Sci. Technol.*, **5**, 4001-4007, (2015), DOI: 10.1039/C5CY00719D.
5. M. Zuo, X. Zheng, W. Che, K. Wang, Y. Chen, X.i Zeng, *Separat. Purif. Technol.*, **362** (3), 131904, (2025), <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.131904>.
6. W. Zou, L. Yang, Z. Duan, J. Wang, S. Zhou, D. Yin, Q. Xu, X. Liu, *Molec. Cat.*, **578**, 114996, (2025), <https://doi.org/10.1016/j.mcat.2025.114996>.
7. S. Bedoya, D. González-Vera, E. Leal-Villarroel, F. Gracia, M.E. Domine, G.Pecchi, C.C. Torres, C.H. Campos, *Inorg. Chem. Commun.*, **182** (3), 115559, (2025), <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2025.115559>.
8. C. Van Tran, T.-D. Dang, V.D. Lai, G. Thi Nguyen, B. Thi Hoa, H.T. Nguyen, H.P.N. Thi, T.T. Nguyen, D.D. La, *Fuel*, **380**, 133196, (2025), DOI: 10.1016/j.fuel.2024.133196.
9. M.A.A. El-Khair, A.G. Al-Gamal, K.I. Kabel, W.S. Gado, A.S. Morshedy *Int. J. Hydrog. Energy*, **101**, 280-294, (2025), DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.12.449
10. I. Othman, S. Al Jitan, F. Banat, G. Palmisano, M. Abu Haija, *Mat. Today Nano*, **33**, 100719, (2026), DOI: 10.1016/j.mtnano.2025.100719.
11. F. Alheibshy, A. Alkhafaji, D.J. Jasim, P.K. Singh, Y.M. Fahmy, M. Karimov, I. Mahariq, A. Abduvokhidov, S. Usanov, R.A. Haggam, *J. Water Proc. Eng.*, **87**, 110113, (2026), <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2026.110113>.

12. J. Ai, Y. Shuai, M. Hu, L. Cheng, S. Luo, W. Li, Z. Chen, L. Hu, Z. Zhou, *Ceram. Int.*, **49**, 22941-22951, (2023). <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.04.119>.
13. Y. Cheng, S. Zhang, Z. Wang, B. Wang, J. You, R. Guo, H. Zhang, *Sep. Purif. Technol.*, **318**, 123971, (2023), <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.123971>.
14. A. Akbar, B.L.M.A. Howlader, A.V.Q. Arif Islam, T. Chatterjee, M. Ghosh, *J. Water Process Eng.*, **79**, 108871, (2025), [10.1016/j.jwpe.2025.108871](https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.108871).
15. E.D.N. Silva, I.L.O. Brasileiro, V.S. Madeira, B.A. de Farias, M.L.A. Ramalho, E. Rodríguez-Aguado, E. Rodríguez-Castellón, *J. Environ. Chem. Eng.*, **8**, 104132, (2020), <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104132>.
16. X. Guo, K. Wang, Y. Xu, *Mater. Sci. Eng., B*, **245**, 75-84, (2019), <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2019.05.015>.
17. J. Wen, Y. Long, L. Zhu, L. Zeng, X. Qin, S. Song, M. Lu, L. Deng, *Environ. Res.*, **275**, 121413, (2025), <https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.121413>.
18. X. Wei, J. Zang, P. Chen, Z. Wang, S. Wang, Y. Zhao, Z. Fang, *J. Water Process Eng.*, **71**, 107436, (2025), <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.107436>.
19. V. Vasudevan, B. Pei, W. Xiong, J. He, S. Li, D. Huang, X. Liao, J. Lin, *J. Environ. Chem. Eng.*, **12**, 114813, (2024), <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.114813>.
20. X. Guo, K. Wang, D. Li, J. Qin, *Appl. Surf. Sci.*, **420**, 792-801, (2017), <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.05.178>.
21. S.X. Yin, S. Jiang, R. Chen, B. Chen, W. Xie, D. Li, *Inorg. Chem. Commun.*, **183** (2), 115931, (2026), <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2025.115931>.
22. Shabelskaya N., Sulima S., Sulima E., Medennikov O., Kulikova M., Kolesnikova T., Sushkova S. *Gels*, **9**, (3), 217, (2023), DOI: 10.3390/gels9030217.

© **Е. А. Зеленская** – к.т.н., доцент, кафедра «Общая химия и технология силикатов», Южно-Российский государственный политехнический университет имени М.И. Платова (ЮРГПУ), Новочеркасск, Ростовская область, Россия; **Н. Г. Сундукова** – аспирант, кафедра «Экология и промышленная безопасность», ЮРГПУ; **В. А. Вьяльцев** – к.т.н., доцент, кафедра «Экология и промышленная безопасность», ЮРГПУ; **Н. П. Шабельская** – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой, кафедра «Экология и промышленная безопасность», ЮРГПУ; ведущий научный сотрудник лаборатории «Агробiotехнологии для повышения плодородия почв и качества сельскохозяйственной продукции», Южный федеральный университет, nina_shabelskaya@mail.ru.

© **E. A. Zelenskaya** – PhD (Technical Sci.), Associate Professor, Department of General Chemistry and Technology of Silicates, Platov South-Russian State Polytechnic University (Platov SRSPU), Novocherkassk, Russia; **N. G. Sundukova** – PhD-Student, Department of Ecology and Industrial Safety, Platov SRSPU; **A. V. Vyaltsev** – PhD (Technical Sci.), Associate Professor, Department of Ecology and industrial safety, Platov SRSPU; **N. P. Shabelskaya** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor, Head of the Ecology and Industrial safety department, Platov SRSPU; Leading Researcher at the Laboratory of Agrobiotechnology for Improving Soil Fertility and Agricultural Product Quality, Southern Federal University, nina_shabelskaya@mail.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 15.05.26.

Дата принятия рукописи в печать – 04.06.26.