

Р. Р. Шамилов, З. М. Музипов, Ю. Г. Галяметдинов

СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

ГЕТЕРОСТРУКТУР $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{ZnIn}_2\text{S}_4$

Ключевые слова: нитрид углерода, сульфид цинка индия, фотокаталит, родамин С, видимый свет.

Растущая концентрация устойчивых органических загрязнителей в водных экосистемах, обусловленная промышленными сбросами, представляет серьезную угрозу для окружающей среды и здоровья человека. Недостаточная эффективность традиционных способов очистки актуализирует разработку новых, более совершенных и экономичных технологий. Перспективным методом является фотокаталитическое окисление, использующее энергию солнечного света. Однако широкому применению классических фотокатализаторов, таких как диоксид титана, препятствуют их фундаментальные ограничения: широкая запрещенная зона, поглощающая только УФ-спектр, и высокая скорость рекомбинации носителей заряда. Для преодоления этих недостатков в данной работе предложена стратегия создания гибридного фотокатализатора на основе гетероструктуры графитоподобного нитрида углерода ($g\text{-C}_3\text{N}_4$, CN) и сульфида цинка-индия (ZnIn_2S_4 , ZIS). Целью исследования является синтез гетероструктурного фотокатализатора CN/ZIS и оценка его эффективности в разложении органических загрязнителей под видимым светом. Методами ИК-Фурье и УФ-видимой спектроскопии подтверждено сохранение структуры CN после модификации и показано значительное расширение светопоглощения гибрида в видимую область. Установлено, что формирование гетероструктуры приводит к резкому росту адсорбционной емкости по отношению к метиленовому синему. Фотокаталитическая активность оценена на модели разложения родамина С под светодиодным излучением. Показано, что гибридный фотокатализатор CN/ZIS превосходит по активности индивидуальные компоненты: константа скорости реакции для композита в 3,3 и 1,56 раза выше, чем для чистого CN и ZIS соответственно. Синергетический эффект объясняется формированием гетероперехода типа II, обеспечивающего эффективное разделение носителей заряда и подавление их рекомбинации, а также оптимизацией адсорбционно-десорбционных свойств. Полученный фотокатализатор демонстрирует высокий потенциал для применения в технологии очистки сточных вод под действием солнечного света.

Р. Р. Shamilov, Z. M. Muzipov, Yu. G. Galyametdinov

SYNTHESIS AND STUDY OF PHOTOCATALYTIC PROPERTIES

OF $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{ZnIn}_2\text{S}_4$ HETEROSTRUCTURES

Key words: carbon nitride, zinc indium sulfide, photocatalysis, rhodamine B, visible light.

The growing concentration of persistent organic pollutants in aquatic ecosystems due to industrial discharges poses a serious threat to the environment and human health. The ineffectiveness of traditional purification methods necessitates the development of new, more advanced, and more cost-effective technologies. Photocatalytic oxidation, which utilizes solar energy, is a promising method. However, the widespread use of classic photocatalysts, such as titanium dioxide, is hampered by their fundamental limitations: a wide band gap absorbing only UV light and a high rate of charge carrier recombination. To overcome these drawbacks, this study proposes a strategy for creating a hybrid photocatalyst based on a heterostructure of graphitic carbon nitride ($g\text{-C}_3\text{N}_4$, CN) and zinc indium sulfide (ZnIn_2S_4 , ZIS). The aim of the study was to synthesize a CN/ZIS heterostructured photocatalyst and evaluate its efficiency in degrading organic pollutants under visible light. FTIR and UV-visible spectroscopy confirmed the retention of the CN structure after modification, and demonstrated a significant expansion of the hybrid's light absorption into the visible region. Formation of the heterostructure was found to lead to a sharp increase in the adsorption capacity for methylene blue. Photocatalytic activity was assessed using a model of rhodamine C decomposition under LED radiation. The CN/ZIS hybrid photocatalyst was shown to be more active than the individual components: the reaction rate constant for the composite was 3.3 and 1.56 times higher than that for pure CN and ZIS, respectively. The synergistic effect was attributed to the formation of a type II heterojunction, which ensures efficient separation of charge carriers and suppression of their recombination, as well as to the optimization of adsorption-desorption properties. The resulting photocatalyst demonstrates high potential for use in solar-assisted wastewater treatment.

Введение

Одной из ключевых проблем современной экологии является интенсивное загрязнение водных ресурсов устойчивыми органическими соединениями, поступающими со сточными водами различных промышленных производств. Традиционные методы очистки зачастую оказываются недостаточно эффективными для полной деградации этих загрязнителей, что создает острую необходимость в разработке и внедрении передовых, экономичных и экологически

безопасных технологий. Среди них фотокаталитическое окисление, использующее в качестве основного источника энергию солнечного света, представляет собой один из наиболее перспективных подходов [1-3].

В основе процесса лежит способность полупроводниковых материалов генерировать под действием света электрон-дырочные пары, которые при взаимодействии с молекулами воды и растворенного кислорода способны формировать кислородсодержащие радикалы (например, $\cdot\text{OH}$, O_2^-), которые способны неселективно окислять и

минерализовать широкий спектр органических загрязнений до CO_2 , H_2O и других безвредных соединений [4, 5]. Однако широкому практическому применению фотокатализа препятствуют несколько фундаментальных ограничений многих классических полупроводников (таких как TiO_2), а именно: широкая запрещенная зона, поглощающая лишь ультрафиолетовую часть солнечного спектра, и быстрое рекомбинация фотоиндуцированных носителей заряда, что значительно снижает квантовую эффективность процесса.

Для преодоления этих ограничений применяют стратегию создания гибридных фотокатализаторов на основе гетероструктур типа II или Z-схемы, которые доказали свою высокую эффективность. Такие системы позволяют расширить спектр светопоглощения в видимую область и пространственно разделить фотогенерированные электроны и дыры между компонентами гетероструктуры, существенно снижая их рекомбинацию [6-8].

В данном контексте особый интерес представляет создание гетероструктуры на основе графитоподобного нитрида углерода ($\text{g-C}_3\text{N}_4$, CN) и сульфида цинка индия (ZnIn_2S_4 , ZIS). CN структуры обладают рядом преимуществ: подходящей краевой зоной для восстановления кислорода, химической стабильностью, устойчивостью к фотокоррозии и низкой стоимостью [9-11]. Однако им характерно умеренное поглощение видимого света и высокая скорость рекомбинации зарядов. В свою очередь полупроводник ZIS обладает узкой запрещенной зоной ($\sim 2,0$ – $2,4$ эВ), обеспечивающей эффективное поглощение видимого света, и выдающимися фотокаталитическими и адсорбционными свойствами [12, 13]. Комбинирование этих двух материалов позволяет создать синергетический эффект: CN служит отличной платформой для нанесения и стабилизации ZIS, в то время как ZIS выступает как эффективный сенсибилизатор, расширяющий спектр светопоглощения композита. Формирование между ними гетероперехода способствует эффективному разделению зарядов, значительно повышая фотокаталитическую активность [14-16].

Целью настоящей работы является синтез фотокатализаторов на основе гетероструктуры $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{ZnIn}_2\text{S}_4$ (CN/ZIS) а также оценка их эффективности в реакции фотокаталитического разложения модельных органических загрязнителей под действием видимого света.

Экспериментальная часть

CN структуры были получены термическим разложением меламина (ч.д.а.) при 550°C в течение 2 часов. Для синтеза гетероструктур CN/ZIS предварительно 100 мг CN обработали с помощью ультразвука (100 Вт, 44 кГц) в 30 мл дистиллированной воды в течение 10 минут. Далее к полученной дисперсии добавили 51,8 мг цинка ацетат дигидрат (ч.д.а., Реахим), 137,4 мг индия ацетат (III) (99,9%, Sigma Aldrich) и 88,4 мг

тиоацетамида (ч.д.а., Род) и выдерживали в гидротермальном реакторе при 180°C в течение 12 часов. После синтеза продукты реакции были очищены трехкратным осаждением с помощью центрифugирования. Образцы ZIS получены аналогичным образом без добавления CN.

ИК-Фурье-спектры получены на фурье-спектрометре Bruker ALPNA-T S/N 102706. Спектры поглощения образцов сняты спектрометре Perkin Elmer Instrumental LAMBDA 35 UV/VIS Spectrometer, спектры люминесценции сняты на спектрофлуориметре Varian Cary Eclipse.

Адсорбционная емкость полученных соединений определяли по методике, описанной в [17]. 20 мг образца диспергировали в 100 мл раствора метиленового синего (ч.д.а.) и перемешивали в течение 1 часа для установления адсорбционного равновесия. Концентрацию красителя подбирали таким образом, чтобы в растворе в состоянии равновесия находилось 30–50% неадсорбированного красителя. После этого для удаления катализатора раствор пропустили через шприцевым фильтр с размером пор 0,22 мкм. Концентрацию красителя в полученном растворе определяли спектрофотометрически по интенсивности пика поглощения при 665 нм. Разница в концентрациях начального и конечного раствора соответствует количеству поглощенного красителя.

Фотокаталитические исследования проведены на примере разложения Родамина С (ч.д.а.) при облучении светодиодным модулем синего света (пик излучения – 450 нм) с мощностью 50 Вт. Для фотокаталитических исследований 5 мг CN/ZIS диспергировали в 15 мл дистиллированной воде с помощью ультразвука (44 кГц, 100 Вт) в течение 15 мин. Затем к смеси добавили раствор родамина С (3 мл, 1 ммоль/л) и перемешивали в темноте в течение 30 мин для достижения адсорбционного равновесия. Контроль процесса фоторазложения проводилась путем отбора проб через определенные промежутки времени от начала облучения. Реакционная смесь термостатировалась при 25°C . Отобранные пробы центрифугировали при 3000 об/мин в течение 15 мин для осаждения взвеси фотокатализатора.

Обсуждение результатов

В ходе данных исследований CN структуры были получены пиролизом меламина, которые далее были подвергнуты гидротермальной обработке в присутствии солей цинка, индия и тиоацетамида для получения гибридных материалов на основе ZIS. Соотношение компонентов было подобрано для получения гибридов CN/ZIS с массовым соотношением 1:1.

ИК-спектры синтезированных образцов представлены на рис. 1. Для чистого CN наблюдается широкая полоса поглощения в области 3000–3600 cm^{-1} , соответствующая колебаниям N-H и O-H связей, обусловленные наличием аминогрупп и адсорбированной воды. Интенсивные полосы в диапазоне 1200–1650 cm^{-1} соответствуют колебаниям ароматических C-N связей гетероциклических колец.

Характерный узкий пик при 810 см^{-1} относится к внеплоскостным деформационным колебаниям триазиновых колец. В спектрах гибридных материалов CN/ZIS присутствуют все характерные полосы нитрида углерода, что подтверждает сохранение его структуры после модификации. Для чистого ZIS наблюдается широкая полоса высокой интенсивности при $3200-3600 \text{ см}^{-1}$, соответствующая колебаниям O-H связей молекул адсорбированной воды.

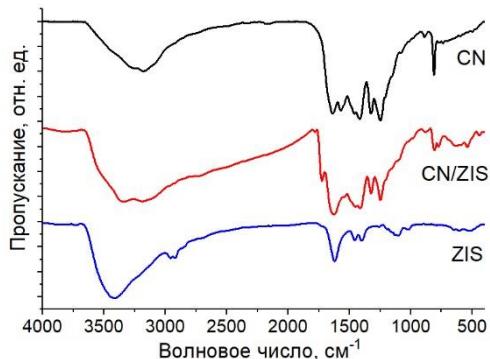


Рис. 1 – ИК-Фурье полученных образцов

Fig. 1 – FTIR spectrum of the obtained samples

По данным УФ-видимой спектроскопии (рис. 2) образец CN поглощает видимый свет только в коротковолновой области. Формирование гетероструктуры CN/ZIS приводит к значительному смещению края поглощения в длинноволновую (красную) область спектра, что свидетельствует о снижении ширины запрещенной зоны гибридного материала по сравнению с индивидуальным CN и улучшении его светопоглощающих свойств.

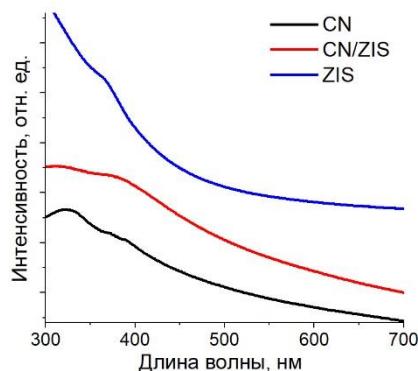


Рис. 2 – Спектры поглощения полученных образцов

Fig. 2 – Absorption spectra of the obtained samples

Была изучена адсорбционная емкость (AE) полученных материалов на примере поглощения метиленового синего из водного раствора. Установлено, что исходный CN обладает низкой AE ($\sim 12 \text{ мг/г}$). В то же время ZIS, благодаря развитой поверхности демонстрирует очень высокую AE ($\sim 200 \text{ мг/г}$). Образование гетероструктур CN/ZIS

способствует значительному возрастанию адсорбционной емкости относительно CN (до $\sim 165 \text{ мг/г}$), что свидетельствует об успешном формировании нанослойной оболочки ZIS на поверхности нитрида углерода.

Фотокаталитические исследования проведены на примере модельной реакции разложения красителя Родамина С под действием видимого света (Рис. 3). Степень разложения красителя контролировали спектрофотометрически, отслеживая снижение интенсивности характерного пика поглощения при 554 нм [18, 19].

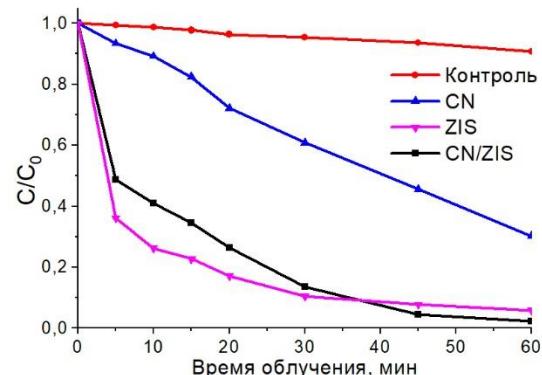


Рис. 3 – Кинетические кривые реакции разложения родамина С в присутствии исследованных образцов

Fig. 3 – Kinetic curves of the decomposition of rhodamine B in the presence of studied samples

Контрольный эксперимент (без катализатора) подтвердил высокую фотостабильность красителя в используемых условиях.

Введение в реакционную смесь чистого CN привело к существенному увеличению скорости деградации, что демонстрирует его собственную, хотя и умеренную, фотокаталитическую активность в видимой области спектра. Образцы ZIS и CN/ZIS показали значительно высокую скорость реакции разложения красителя. При этом их кинетические кривые характеризуются резким падением концентрации в первые 5 минут, обусловленным в значительной степени высокой предварительной адсорбцией красителя на поверхности. Дальнейшее разложение протекает медленнее, что связано с необходимостью десорбции промежуточных продуктов и адсорбции новых молекул красителя, а также с кинетикой генерации активных форм кислорода.

На основе полученных кинетических кривых и с учетом того, что большинство фотокаталитических реакций относится к реакциям первого порядка, были рассчитаны константы скорости (k) разложения красителя графическим способом (рис. 4). Для того, чтобы отсечь влияние первичной адсорбции, в расчетах были использованы данные в интервале времени 5-45 минут.

Полученные значения констант скорости реакции представлены на таблице 1.

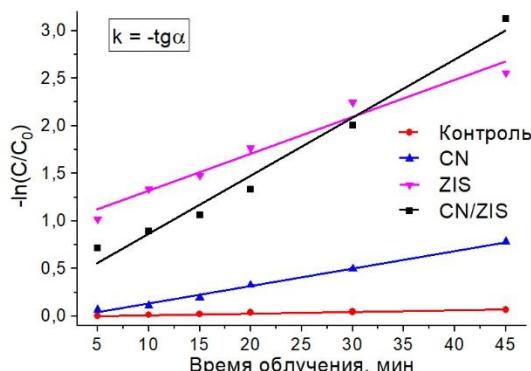


Рис. 4 – График зависимости $-\ln(C/C_0)$ от времени облучения исследованных образцов

Fig. 4 – Graph of the dependence of $-\ln(C/C_0)$ on the irradiation time of the studied samples

Таблица 1 – Константы скорости фотокаталитического разложения Родамина С исследованных образцов

Table 1 – Rate constants for the photocatalytic decomposition of Rhodamine C from the samples studied

Образец	Константа скорости, мин^{-1}
Контроль	0,0015
CN	0,0185
ZIS	0,039
CN/ZIS	0,061

Установлено, что фотокаталитическая активность образцов возрастает в ряду: CN < ZIS < CN/ZIS.

Чистый ZIS проявляет более высокую начальную адсорбционную емкость, чем гибрид CN/ZIS. Однако в ходе облучения кинетика деградации для этих образцов существенно различается. Можно предположить, что очень высокая адсорбционная способность чистого ZIS, с одной стороны, способствует концентрированию реагента у активных центров, но с другой – приводит к их блокировке, затрудняет десорбцию продуктов разложения и доступ молекул кислорода и воды, необходимых для генерации активных форм кислорода (АФК). Это обуславливает быстрое замедление реакции.

Гибридный фотокатализатор CN/ZIS превосходит по активности индивидуальные компоненты: его константа скорости в 3,3 раза выше, чем у CN, и в 1,56 раза выше, чем у ZIS. Усиление активности можно объяснить синергетическим эффектом, возникающим по двум основным причинам.

Во-первых, формирование гибрида CN/ZIS оптимизирует баланс между адсорбцией реагента и десорбцией продуктов. Это предотвращает перегруженность активных центров и обеспечивает их постоянную доступность для генерации АФК.

Во-вторых, ключевым фактором является образование гетероперехода типа II между CN и ZIS, что способствует более эффективному пространственному разделению носителей заряда – электронов и дырок – подавляя их рекомбинацию и

увеличивая количество активных частиц, участвующих в окислительно-восстановительных реакциях.

Заключение

В работе успешно синтезирован и исследован гибридный фотокатализатор CN/ZIS на основе графитоподобного нитрида углерода и сульфида цинка индия. Подтверждено сохранение структуры CN после модификации и показано значительное расширение светопоглощения гибрида в видимую область. Формирование гетероструктуры привело к многократному росту адсорбционной емкости, способствующей концентрированию реагента.

Продемонстрирована превосходная фотокаталитическая активность гибрида CN/ZIS в реакции разложения родамина С, превышающая активность индивидуальных компонентов. Синергетический эффект обусловлен предполагаемым формированием гетероструктуры типа II, обеспечивающей эффективное разделение носителей заряда и увеличение выхода активных форм кислорода.

Таким образом, полученный фотокатализатор CN/ZIS демонстрирует высокий потенциал для применения в экологических технологиях, в частности, для фотокаталитической очистки сточных вод от устойчивых органических загрязнений под действием солнечного света.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания на оказание государственных услуг (выполнение работ) от 29.12.2022 г. № 075-01508-23-00. Тема исследования «Создание научных основ получения новых мультифункциональных материалов широкого спектра применения» (FZSG-2023-0008).

Литература

1. A. Ganeshan, N. Jha, *Int. J. Adv. Eng. Sci. Appl. Math.*, **17**, 146-166 (2025). DOI: 10.1007/s12572-025-00400-2.
2. S. Cao, A. Thomas, C. Li, *Angew. Chem., Int. Ed.*, **62**, 8 e202214391 (2023). DOI: 10.1002/anie.202214391.
3. Z. Xie, Y. P. Peng, L. Yu, C. Xing, M. Qiu, J. Hu, H. Zhang, *Sol. RRL*, **4**, 3, 1900400 (2020). DOI: 10.1002/solr.201900400.
4. M. A. Rauf, S. S. Ashraf, *Chem. Eng. J.*, **151**, 10 (2009). DOI: 10.1016/j.cej.2009.02.026
5. B. Viswanathan, *Curr. Catal.*, **7**, 2, 99-121 (2018). DOI: 10.2174/221154470766171219161846.
6. J. Liu, N. Ma, W. Wu, Q. He, *Chem. Eng. J.*, **393**, 124719 (2020). DOI: 10.1016/j.cej.2020.124719.
7. H. Yang, *Mater. Res. Bull.*, **142**, 111406 (2021). DOI: 10.1016/j.materresbull.2021.111406.
8. Y. Wang, Q. Wang, X. Zhan, F. Wang, M. Safdar, J. He, *Nanoscale*, **5**, 18, 8326-8339 (2013). DOI: 10.1039/C3NR01577G.
9. D. Bhandari, P. Lakhani, C. K. Modi, *RSC Sustainability*, **2**, 2, 265-287 (2024). DOI: 10.1039/D3SU00382E.
10. F. Ding, D. Yang, Z. Tong, Y. Nan, Y. Wang, X. Zou, Z. Jiang, *Environ. Sci.: Nano*, **4**, 7, 1455-1469 (2017). DOI: 10.1039/C7EN00255F.

11. W. Iqbal, B. Yang, X. Zhao, M. Rauf, M. Waqas, Y. Gong, Y. Mao, *Catal. Sci. Technol.*, **8**, 18, 4576-4599 (2018). DOI: 10.1039/C8CY01061G.
12. R. Yang, L. Mei, Y. Fan, Q. Zhang, R. Zhu, R. Amal, Z. Zeng, *Small Methods*, **5**, 10, 2100887 (2021). DOI: 10.1002/smtd.202100887.
13. V. B. Y. Oh, S. F. Ng, W. J. Ong, *EcoMat*, **4**, 5, e12204 (2022). DOI: 10.1002/eom2.12204.
14. Y. Lu, Z. Zhuang, L. Li, F. F. Chen, P. Wei, Y. Yu, *J. Mater. Chem. A*, **13**, 4718-4745 (2025). DOI: 10.1039/D4TA06091A.
15. R. R. Shamilov, Z. M. Muzipov, D. O. Sagdeev, K. V. Kholin, A. F. Saifina, A. T. Gubaidullin, Y. G. Galyametdinov, *C*, **9**, 3, 85 (2023). DOI: 10.3390/c9030085.
16. R. R. Shamilov, A. E. Zavorotko, T. P. Sultanov, I. R. Vakhitov, Y. G. Galyametdinov, *J. Photochem. Photobiol. A*, **455**, 115791 (2024). DOI: 10.1016/j.jphotochem.2024.115791.
17. R. Zhang, M. Ma, Q. Zhang, F. Dong, Y. Zhou, *Appl. Catal., B*, **235**, 235, 17-25 (2018). DOI: 10.1016/j.apcatb.2018.04.061.
18. Р. Р. Шамилов, Б. Д. Нуриахметов, Д. О. Сагдеев, Ю. Г. Галяметдинов, *Вестник Технологического университета*, **25**, 11, 45-49 (2022). DOI: 10.5542/1998-7072_2023_26_7_12.
19. Д. О. Сагдеев, Р. Р. Шамилов, Ю. Г. Галяметдинов, *ЖПС*, **88**, 3, 419-425 (2021).
6. J. Liu, N. Ma, W. Wu, Q. He, *Chem. Eng. J.*, **393**, 124719 (2020). DOI: 10.1016/j.cej.2020.124719.
7. H. Yang, *Mater. Res. Bull.*, **142**, 111406 (2021). DOI: 10.1016/j.materresbull.2021.111406.
8. Y. Wang, Q. Wang, X. Zhan, F. Wang, M. Safdar, J. He, *Nanoscale*, **5**, 18, 8326-8339 (2013). DOI: 10.1039/C3NR01577G.
9. D. Bhanderi, P. Lakhani, C. K. Modi, *RSC Sustainability*, **2**, 2, 265-287 (2024). DOI: 10.1039/D3SU00382E.
10. F. Ding, D. Yang, Z. Tong, Y. Nan, Y. Wang, X. Zou, Z. Jiang, *Environ. Sci.: Nano*, **4**, 7, 1455-1469 (2017). DOI: 10.1039/C7EN00255F.
11. W. Iqbal, B. Yang, X. Zhao, M. Rauf, M. Waqas, Y. Gong, Y. Mao, *Catal. Sci. Technol.*, **8**, 18, 4576-4599 (2018). DOI: 10.1039/C8CY01061G.
12. R. Yang, L. Mei, Y. Fan, Q. Zhang, R. Zhu, R. Amal, Z. Zeng, *Small Methods*, **5**, 10, 2100887 (2021). DOI: 10.1002/smtd.202100887.
13. V. B. Y. Oh, S. F. Ng, W. J. Ong, *EcoMat*, **4**, 5, e12204 (2022). DOI: 10.1002/eom2.12204.
14. Y. Lu, Z. Zhuang, L. Li, F. F. Chen, P. Wei, Y. Yu, *J. Mater. Chem. A*, **13**, 4718-4745 (2025). DOI: 10.1039/D4TA06091A.
15. R. R. Shamilov, Z. M. Muzipov, D. O. Sagdeev, K. V. Kholin, A. F. Saifina, A. T. Gubaidullin, Y. G. Galyametdinov, *C*, **9**, 3, 85 (2023). DOI: 10.3390/c9030085.
16. R. R. Shamilov, A. E. Zavorotko, T. P. Sultanov, I. R. Vakhitov, Y. G. Galyametdinov, *J. Photochem. Photobiol. A*, **455**, 115791 (2024). DOI: 10.1016/j.jphotochem.2024.115791.
17. R. Zhang, M. Ma, Q. Zhang, F. Dong, Y. Zhou, *Appl. Catal., B*, **235**, 235, 17-25 (2018). DOI: 10.1016/j.apcatb.2018.04.061.
18. R. R. Shamilov, B. D. Nuriakhmetov, D. O. Sagdeev, Yu. G. Galyametdinov, *Herald of Technological University*, **25**, 11, 45-49 (2022). DOI: 10.5542/1998-7072_2023_26_7_12.
19. D. O. Sagdeev, R. R. Shamilov, Yu. G. Galyametdinov, *J. Appl. Spectrosc.*, **88**, 3, 539-545 (2021). DOI: 10.1007/s10812-021-01206-3.

References

1. A. Ganeshan, N. Jha, *Int. J. Adv. Eng. Sci. Appl. Math.*, **17**, 146-166 (2025). DOI: 10.1007/s12572-025-00400-2.
2. S. Cao, A. Thomas, C. Li, *Angew. Chem., Int. Ed.*, **62**, 8 e202214391 (2023). DOI: 10.1002/anie.202214391.
3. Z. Xie, Y. P. Peng, L. Yu, C. Xing, M. Qiu, J. Hu, H. Zhang, *Sol. RRL*, **4**, 3, 1900400 (2020). DOI: 10.1002/solr.201900400.
4. M. A. Rauf, S. S. Ashraf, *Chem. Eng. J.*, **151**, 10 (2009). DOI: 10.1016/j.cej.2009.02.026
5. B. Viswanathan, *Curr. Catal.*, **7**, 2, 99-121 (2018). DOI: 10.2174/2211544707666171219161846.

© Р. Р. Шамилов – к.х.н., доцент кафедры Физической и коллоидной химии (ФХХ), Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ), Казань, Россия, reedish@mail.ru; 3. М. Музипов – аспирант каф. ФХХ КНИТУ, mr.zuzu1011@mail.ru; Ю. Г. Галяметдинов – д.х.н., проф. каф. ФХХ КНИТУ, yugal2002@mail.ru.

© R. R. Shamilov – PhD (Chemical Sci.), Associate Professor, Department of Physical and Colloid Chemistry (PCC), Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan, Russia, reedish@mail.ru; Z. M. Muzipov – PhD-student of the PCC department, KNRTU, mr.zuzu1011@mail.ru; Yu. G. Galyametdinov – Doctor of Sciences (Chemical Sci.), Professor of the PCC department, KNRTU, yugal2002@mail.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 23.09.25.

Дата принятия рукописи в печать – 23.11.25.