

Е. С. Лютова, Д. К. Иванова, Л. П. Борило,
А. А. Бузаев

СИНТЕЗ И СВОЙСТВА ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2/\text{ZnO}$

Ключевые слова: фотокатализ, золь-гель метод, фотокаталитический материал, диоксид титана

В статье предложен способ получения фотокаталитических материалов на основе системы $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2/\text{ZnO}$ с массовым соотношением компонентов 65:10:10 и добавкой P_2O_5 15 мас. %. Для получения материалов был приготовлен спиртовой раствор по золь-гель технологии на основе тетрабутоксидтитана, тетраэтоксисилана, нитрата цинка, ортофосфорной кислоты. Процессы, протекающие при формировании твердой фазы, исследованы методом синхронного термического анализа (СТА). Для обеспечения кристаллизации диоксида титана в анатазной модификации проведена ступенчатая термообработка: сушка при 60 °С и последующий отжиг при 300, 400, 500 и 600 °С по 30 минут на каждом этапе. Кислотно-основные характеристики поверхности определены рН-метрией, установлено, что на поверхности материала присутствуют кислотные центры Льюиса (Si^{4+} , Ti^{4+}), способствующие повышению фотокаталитической активности за счёт адсорбции реагентов. Структурно-фазовое строение материалов изучено комплексом методов – рентгенофазовым анализом и ИК-спектроскопией. Ширину запрещенной зоны полученных материалов определяли по краю собственной полосы поглощения в диапазоне волн 190-1000 нм. Установлено уменьшение значений энергии ширины запрещенной зоны путем создания примесной проводимости за счет контакта частиц цинка с анатазной фазой диоксида титана, что говорит о смещении поглощения светового излучения в видимую область. Фотокаталитическая эффективность оценена по скорости фотодеградационной модельного загрязнителя (метилового оранжевого). Установлено, что введение ионов цинка (Zn^{2+}) способствует генерации и разделению электронно-дырочных пар в диоксиде титана, что усиливает окислительную способность материалов по отношению к органическим соединениям. Полученные результаты подтверждают перспективность разработанных материалов для дальнейших исследований в области фотокаталитической очистки водных сред и атмосферы от органических загрязнителей.

E. S. Lyutova, D. K. Ivanova, L. P. Borilo,
A. A. Buzaev

SYNTHESIS AND PROPERTIES OF PHOTOCATALYTIC MATERIALS BASED ON THE $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2/\text{ZnO}$ SYSTEM

Key words: photocatalysis, sol-gel method, photocatalytic material, titanium dioxide.

This article proposes a method for producing photocatalytic materials based on the $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2/\text{ZnO}$ system with a 65:10:10 component weight ratio and a 15 wt.% P_2O_5 additive. To obtain the materials, an alcohol solution based on tetrabutoxynitrate, tetraethoxysilane, zinc nitrate, and orthophosphoric acid was prepared using sol-gel technology. The processes occurring during solid-phase formation were studied using simultaneous thermal analysis (STA). To ensure crystallization of titanium dioxide in the anatase modification, a stepwise heat treatment was performed: drying at 60 °C and subsequent annealing at 300, 400, 500, and 600 °C for 30 minutes at each stage. The acid-base characteristics of the surface were determined by pH-metry. It was established that the material surface contains Lewis acid sites (Si^{4+} , Ti^{4+}), which enhance photocatalytic activity due to reagent adsorption. The structural and phase composition of the materials was studied using a combination of methods, including X-ray phase analysis and IR spectroscopy. The band gap of the obtained materials was determined from the edge of the intrinsic absorption band in the wavelength range of 190-1000 nm. A decrease in the energy of the band gap was established by creating impurity conductivity due to contact between zinc particles and the anatase phase of titanium dioxide, indicating a shift in light absorption to the visible region. Photocatalytic efficiency was assessed based on the photodegradation rate of a model pollutant (methyl orange). The introduction of zinc ions (Zn^{2+}) was found to promote the generation and separation of electron-hole pairs in titanium dioxide, which enhances the oxidizing ability of the materials with respect to organic compounds. The obtained results confirm the potential of the developed materials for further research in the field of photocatalytic purification of aquatic environments and the atmosphere from organic pollutants.

Введение

За последние годы наблюдается все больший растущий интерес к фотокаталитическим процессам [1-4]. Уже проведено множество исследований с использованием фотокатализаторов в области очистки вод и воздуха от вредных органических соединений, преобразования солнечной энергии в химическую и электрическую, создание сенсоров и устройств нанофотоники и других. Полупроводники зачастую обладают хорошей химической и термической стабильностью, что делает их

перспективными для использования в различных условиях окружающей среды. Среди них выделяют диоксид титана благодаря своей высокой эффективности в фотокаталитических процессах, стабильности в химическом отношении, доступной цене и безопасности для здоровья [4]. Однако использование диоксида титана в фотокатализе имеет свои недостатки. В настоящее время основной причиной низкой эффективности преобразования солнечной энергии для TiO_2 является ширина запрещенной зоны, составляющая

3,2 и 3,0 эВ для анатаза и рутила соответственно [3]. Это означает, что TiO_2 может быть возбужден только ультрафиолетовым излучением с длиной волны менее 380 нм, что составляет всего лишь 5% солнечного спектра. Поэтому разработка фотокатализаторов, способных поглощать свет в видимой области спектра, представляет большой интерес и требует создания материалов с шириной запрещенной зоны менее 3,0 эВ. Один из перспективных способов увеличения активности фотокатализаторов заключается в модифицировании диоксида титана добавками различного происхождения. В результате допирования катионами, в структуре TiO_2 появляется определенное количество дефектов, которые могут выступать в качестве центров рекомбинации зарядов [3]. В качестве катализатора для фотохимических реакций, наряду с TiO_2 возможно применять ZnO [5-7]. Это связано с особенностями электронной структуры этого полупроводника, особенно с шириной запрещенной зоны (3,37 эВ). Известно, что в наноразмерном состоянии ZnO обладает повышенной активностью в фотокатализе в различных средах благодаря своей высокоразвитой поверхности с однородным распределением активных центров, что способствует более эффективному перемещению заряженных частиц к местам реакции на поверхности [7, 8]. Именно поэтому внесение ZnO в систему $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ в качестве катализатора, а также с целью допирования цинком диоксида титана способно повысить фотокаталитическую активность получившегося композитного материала [9-11]. Цель данной работы заключается в синтезе и исследовании свойств фотокаталитических материалов на основе системы $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2/\text{ZnO}$.

Материалы и методы исследований

Образцы на основе системы $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2/\text{ZnO}$ были получены по золь-гель технологии. Для получения золя использовали тетраэтоксисилан (х.ч., АО «Экос-1»), ортофосфорная кислота (ос.ч. ООО «Компонент-Реактив») нитрат цинка (ч.д.а. ООО «Компонент-Реактив») и тетрабутоксититан (ос.ч. Acros Organics BVBA), растворитель бутанол (АО «Экос-1»). Концентрация $\text{Ti}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4 - 0,1 \text{ M}$; $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4 - 0,5 \text{ M}$; $\text{H}_3\text{PO}_4 - 0,4 \text{ M}$; $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 - 0,3 \text{ M}$. Температурные стадии формирования композитов были определены с помощью термического анализатора STA 449 F1 Jupiter, сопряженного с газовым масс-спектрометром QMS 403 Aeolos при нагреве до 1000 °C (скорость нагрева 10 град·мин⁻¹) в потоке воздуха 100 мл/мин. ИК-спектры порошков были получены с помощью Фурье-спектрометра Nicolet 6700 (Thermo Scientific). Измерения pH проводили на pH-метре «Мультитест» с электродом марки ЭСК – 10601/7. Ширину запрещенной зоны образцов определяли путем исследования границы собственной полосы поглощения с использованием сканирующего спектрофотометра «ЭКРОС» модели ПЭ-5400УФ в диапазоне длин волн от 190 нм до 1000 нм. Фазовый состав полученных материалов определяли методом

рентгенофазового анализа (РФА) на дифрактометре Rigaku MiniFlex 600. Полнопрофильный дифракционный анализ проводили с использованием программы ReX и базой данных Crystallography Open Database. Элементный состав и морфологию поверхности исследовали на сканирующем электронном микроскопе Hitachi TM-3000 (Thermo Fisher Scientific) с приставкой ShiftED 3000 для микрорентгеноспектрального анализа. Фотокаталитическую активность полученных материалов оценивали с использованием фотометрического метода, основываясь на изменении концентрации раствора индикатора (метилоранжевого), происходящего в результате окисления индикатора при облучении образца фотокаталитического материала, помещенного в раствор индикатора, светом с длиной волны 380 нм.

Результаты исследований и их обсуждения

Для формирования материала готовили агрегативно устойчивый золь в пересчете на оксиды $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2\text{-ZnO-P}_2\text{O}_5$, 65–10–10–15 мас.%. Растворы пригодны для получения материалов до 5 суток при значениях вязкости до 3,84 мм²/с.

На основании данных синхронного термического анализа (СТА) проанализированы условия и процессы, происходящие в ходе формирования материалов на основе системы $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2/\text{ZnO}$ (рис.1).

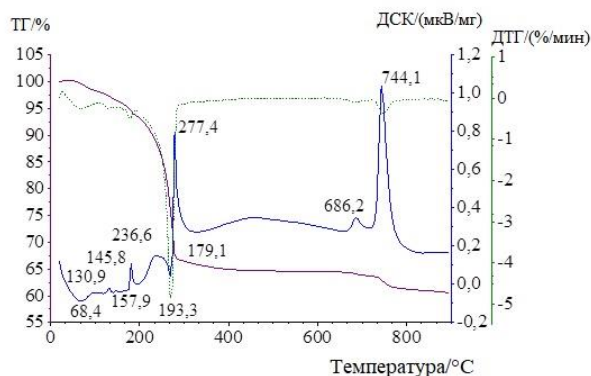


Рис. 1 – Данные термогравиметрического анализа материала на основе системы $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2/\text{ZnO}$

Fig. 1 – Data from thermogravimetric analysis of the material based on the $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2/\text{ZnO}$ system

До 300 °C на кривой ДСК наблюдается один эндотермический эффект при $T_{\text{max}} 68,4 \text{ °C}$ и несколько экзотермических эффектов, $T_{\text{max}} 277,4 \text{ °C}$. Возможно, это связано с удалением химически и физически связанной воды, спиртовых групп. Дальнейшая термообработка до 500 °C приводит к удалению органических продуктов термоокислительной деструкции этоксигрупп, разложение буюкси-групп и деструкция нитратов. Третья стадия охватывает температурный интервал от 500 до 900 °C $T_{\text{max}} 686,2 \text{ °C}$ и $744,1 \text{ °C}$. На этой

стадии продолжается разложение нитрата цинка и начинается кристаллизация продуктов.

Методом ИК-спектроскопии были установлена структура материалов на основе системы $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2/\text{ZnO}$ при различных температурах отжига (рис. 2).

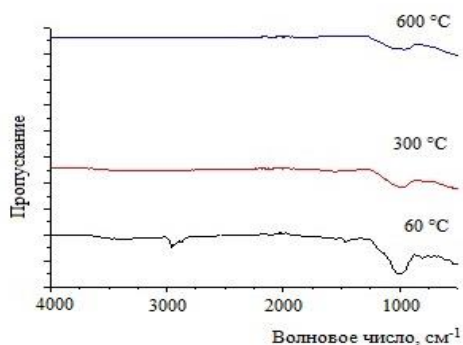


Рис. 2 – ИК-спектры материала на основе системы $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2/\text{ZnO}$ при различных температурах

Fig. 2 – IR spectra of a material based on the $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2/\text{ZnO}$ system at various temperatures

При температурах 60 и 300 °C присутствуют органические остатки, адсорбированная вода, валентные колебания P=O , -PO_4^{3-} , Si-O , Zn-O-Ti . При температуре 600 °C фиксируются колебания Ti-O , Ti-O-Ti , P-O-P . Валентным колебаниям PO_4^{3-} , P=O , HPO_4^{2-} , P-O-P соответствуют полосы поглощения в области 846 – 1280 cm^{-1} . Для валентных колебаний Zn-O-Ti характерны полосы поглощения в интервале 688 – 702 cm^{-1} . Установлено, что в образце присутствуют связи Zn-O-Ti это доказывает встраивание цинка в структуру материала. В интервале полос поглощения 688 – 702 cm^{-1} фиксируются симметричные колебания Ti-O , Ti-O в TiO_6 , $\delta(\text{Si-O-Si})$. В области 523 – 530 cm^{-1} фиксируются валентные колебания Ti-O , Ti-O-Ti , деформационные колебания P-O-P [12].

По результатам рентгенофазового анализа (РФА) установлено, что после термической обработки при 600 °C в образце доминируют две оксидные фазы: тетрагональный диоксид титана (анатаз) и гексагональный оксид цинка (цинкит). Одновременно с этим в структуре материала выявлены дополнительные кристаллические соединения – ортосиликат цинка (Zn_2SiO_4) и пирофосфат кремния (SiP_2O_7). Наличие этих фаз указывает на большой вклад добавленного оксида цинка в процессе кристаллизации конечного продукта [13, 14].

Согласно результатам растровой электронной микроскопии (РЭМ), установлено, что образцы обладают высокоразвитой поверхностью, распределение элементов по поверхности образца происходит равномерно (рис. 3).

Помимо высокоразвитой поверхности для практического применения важны кислотно-основные свойства, так как поверхностные свойства играют определяющую роль для процесса фотокатализа. Установлено, что на поверхности материала после погружения в воду присутствуют апротонные кислотные центры, т.к. в первые минуты

после погружения образца pH раствора уменьшается и затем стабилизируется после 13 минут на значении $\text{pH}_{\text{равн}}$ 6,25. Основные центры (Si^{4+} , Ti^{4+}) образца реагируют с OH^- группами воды тем самым увеличивая кислотность среды, а менее прочно связанные ионы H^+ переходят в раствор [15]. Поверхностные Льюисовские кислотные центры способствуют повышению фотокаталитической активности образцов за счет образования гидроксильных радикалов на поверхности фотокатализатора, которые являются высокоактивными окисляющими веществами.

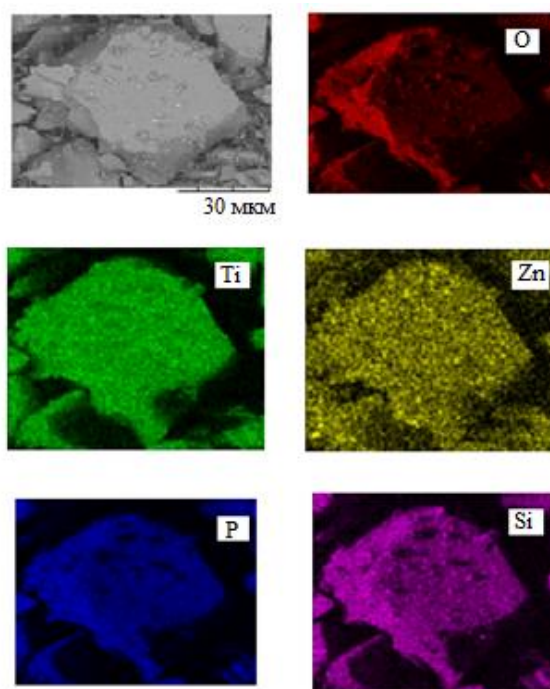


Рис. 3 – Микрофотография и карты распределения элементов по поверхности материала на основе системы $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2/\text{ZnO}$

Fig. 3 – Micrograph and maps of the distribution of elements over the surface of the material based on the $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2/\text{ZnO}$ system

Для исследования фотокаталитической активности был построен предварительно градуировочный график зависимости интенсивности спектров от концентрации растворов метилового оранжевого. На основании результатов исследования установлено, что фотохимическое разложение метилового оранжевого происходит линейно на протяжении всех временных интервалов измерений (рис. 4 а).

Краситель подвергается фотодеградации на 83% в течение трех часов (рис. 4 б) [16]. Результаты исследований показали, что чистый диоксид титана (TiO_2) проявляет низкую фотокаталитическую активность в реакции разложения метилового оранжевого под действием света, что связано с его слабым поглощением излучения в видимой области спектра. Введение цинка в состав фотокатализатора существенно расширяет спектральную

чувствительность материала, обеспечивая эффективное поглощение видимого света и, как следствие, заметно повышая скорость фотодеградации метилового оранжевого [16, 17].

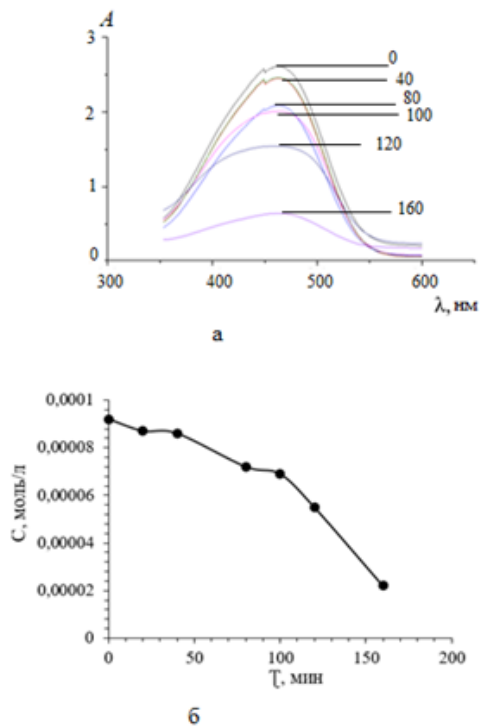


Рис. 4 – Результаты изучения фотокаталитической активности материала на основе системы $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2/\text{ZnO}$ при разложении метилового оранжевого (МО) при ультрафиолетовом облучении в темноте: (а) спектры поглощения раствора МО и (б) кинетика окисления МО

Fig. 4 – Results of studying the photocatalytic activity of a material based on the $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2/\text{ZnO}$ system during the decomposition of methyl orange (MO) under ultraviolet irradiation in the dark: (a) absorption spectra of the MO solution and (b) kinetics of MO oxidation

Ширину запрещенной зоны полученных образцов определяли по положению касательной к графикам зависимости волнового числа (см^{-1}) от пропускания (%) методом спектрофотометрии. Ширина запрещенной зоны анатаза $3,2 \pm 0,5$ эВ [3], а ширина запрещенной зоны исследуемого материала на основе системы $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2/\text{ZnO}$ равна $2,9 \pm 0,5$ эВ. Так как радиус Zn(II) имеет значение $0,083$ нм, а радиус Ti(IV) $0,067$ нм, поэтому не возможно встраивание атомов цинка в кристаллическую решетку анатаза. Но, после термической обработки, возможна локализация на образующихся кристаллитах анатаза или пустотах между ними. Формирование потенциального барьера обусловлено выравниванием уровней Ферми при контакте цинка и анатаза. Перераспределение электронов между компонентами – преимущественно из цинка в анатаз, хотя не исключён и обратный перенос, приводит к сужению ширины запрещенной зоны

анатаза. Это создаёт условия для эффективного разделения электронно-дырочных пар под действием видимого света, что и обуславливает рост фоточувствительности.

Заключение

Фотокаталитические материалы на основе многокомпонентной системы $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ с добавлением ZnO были синтезированы золь-гель методом. Полученные материалы обладают пористой структурой. В полученном образце фиксируются фазы диоксида титана (анатаз), оксида цинка (цинкит), ортосиликата цинка и пиррофосфата кремния. Ширина запрещенной зоны для исследуемого образца составляет $2,9 \pm 0,5$ эВ. Введение оксида цинка в качестве модифицирующей добавки способствует улучшению функциональных характеристик композитов, что делает их перспективными объектами для дальнейших исследований в области фотокатализа.

Исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030)

Литература

1. H. S. Han, *Energy & Fuels*, **37**, 23, 17708–17735 (2023). DOI: 10.1021/acs.energyfuels.3c02382.
2. R. Ahmed, G. Liu, B. Yousaf, Q. Abbas, H. Ullah, M. U. Ali, *J. Clean. Prod.*, **242**, 118409 (2020). DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118409.
3. T. Naseem, T. Durrani, *Environ. Chem. Ecotoxicology*, **3**, 59–75 (2021). DOI: 10.1016/j.enceco.2020.12.001.
4. S. G. Subraveti, S. Roussanaly, R. Anantharaman, L. Riboldi, A. Rajendran, *Appl. Energy*, **306**, 117955 (2022). DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.117955.
5. N. N. Vershinin, I. L. Balikhin, V. I. Berestenko, O. N. Efimov, *High Energ. Chem.* **55**, 2, 76–80 (2021). DOI: 10.3390/catal11070834.
6. T. A. Kandiel, L. Robben, A. Alkaimad, D. Bahnemann, *Photochem. Photobiol. Sci.*, **12**, 602–609 (2013).
7. A. A. Sadovnikov, A. E. Baranchikov, Y. V. Zubavichus, O. S. Ivanova, V. Y. Murzin, V. V. Kozik, V. K. Ivanov, *J. Photochem. Photobiol. A Chem.*, **303–304**, 36–43 (2015). DOI: 10.1016/j.jphotochem.2015.01.010.
8. M. Ijaz, M. Zafar, *Int. J. Energy Res.*, **45**, 3, 3569–3589 (2021). DOI: 10.1002/er.6079.
9. R. Wang, J. H. Xin, Y. Yang, H. Liu, L. Xu, J. Hu, *Appl. Surf. Sci.*, **227**, 312–317 (2004). DOI: 10.1016/j.apsusc.2003.12.012.
10. C. Manoharan, V. Rajendran, R. Sivaraj *Orient. J. Chem.*, **34**, 3, 1333 (2018). DOI: 10.13005/ojc/340319.
11. C. G. Joseph, Y. H. Taufiq-Yap, B. Musta, M. S. Sarjadi, L. Elilarasi. *Front. Chem.* 3–4 (2021). DOI: 10.3389/fchem.2020.568063.
12. D. Bokov, A. Turki, S. Chupradit, S. Wanich *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 1–21 (2021). DOI: 10.1155/2021/5102014.
13. N. Jmal, J. Bouaziz, *Mater. Sci. Eng. A*. **71**. 279–288 (2017). DOI: 10.1016/j.matlet.2017.12.123.
14. O. S. Khalipova, S. A. Kuznetsova, L. A. Selyunina, A. O. Rogacheva, *Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Natural Sciences*, **5**, 154–169 (2023). DOI: 10.18698/1812-3368-2023-5-154-169.
15. S. T. Minakova, V. D. Pakhomova, *Vestn. Tomsk State University*. 2022. № 27. P. 63–72.

16. A.N. Shamsutdinova, A.S. Brichkov, E.A. Paukshtis, T.V. Larina, S.V. Cherepanova, T.S. Clazneva, V.V. Kozik, *Catalysis Communications*, 89, 64-68 (2017).
 17. A.A. Buzaev, A.O. Rogacheva, V.V. Zharkova, V.V. Kozik, *Journal of Physics: Conference Series* 1989 (2021). DOI: 10.1088/1742-6596/1989/1/012019.

References

- 1.H. S. Han, *Energy & Fuels*, **37**, 23, 17708–17735 (2023). DOI: 10.1021/acs.energyfuels.3c02382
 2.R. Ahmed, G. Liu, B. Yousaf, Q. Abbas, H Ullah, M.U. Ali, *J. Clean. Prod.*, **242**, 118409 (2020). DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118409
 3.T. Naseem, T. Durrani, *Environ. Chem. Ecotoxicology*, **3**, 59–75 (2021). DOI: 10.1016/j.enceco.2020.12.001
 4.S.G. Subraveti, S. Roussanaly, R. Anantharaman, L. Riboldi, A. Rajendran, *Appl. Energy*, **306**, 117955 (2022). DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.117955
 5.N.N. Vershinin, I.L. Balikhin, V.I. Berestenko, O.N. Efimov, *High Energ. Chem.* **55**, 2,76–80 (2021). DOI:10.3390/catal11070834
 6.T.A. Kandiel, L. Robben, A. Alkaimad, D. Bahnemann, *Photochem. Photobiol. Sci.*, **12**, 602-609 (2013).
 7.A.A. Sadovnikov, A.E. Baranchikov, Y.V. Zubavichus, O. S. Ivanova, V.Y. Murzin, V.V. Kozik, V.K. Ivanov, *J. Photochem. Photobiol. A Chem.*, **303–304**, 36–43 (2015). DOI: 10.1016/j.jphotochem.2015.01.010
 8.M. Ijaz, M. Zafar, *Int. J. Energy Res.*, **45**, 3, 3569–3589 (2021). DOI:10.1002/er.6079
 9.R. Wang, J.H. Xin, Y. Yang, H. Liu, L. Xu, J. Hu, *Appl. Surf. Sci.*, **227**, 312–317 (2004). DOI: 10.1016/j.apsusc.2003.12.012
 10. C. Manoharan, V. Rajendran, R. Sivaraj *Orient. J. Chem.*, **34**, 3, 1333 (2018). DOI: 10.13005/ojc/340319
 11. C.G. Joseph, Y. H.Taufiq-Yap, B. Musta, M. S. Sarjadi, L. Elilarasi. *Front. Chem.* 3–4 (2021). DOI: 10.3389/fchem.2020.568063
 12. D. Bokov, A.Turki, S.Chupradit, S. Wanich *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 1–21(2021). DOI:10.1155/2021/5102014
 13. N. Jmal, J. Bouaziz, *Mater. Sci. Eng. A*. **71**. 279–288 (2017). DOI: 10.1016/j.matlet.2017.12.123
 14. O.S. Khalipova, S.A. Kuznetsova, L.A. Selyunina, A.O. Rogacheva, *Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Natural Sciences*, **5**, 154–69 (2023). DOI: 10.18698/1812-3368-2023-5-154-169
 15. S.T. Minakova, V.D. Pakhomova, *Vestn. Tomsk State University*. 2022. № 27. P. 63–72.
 16. A.N. Shamsutdinova, A.S. Brichkov, E.A. Paukshtis, T.V. Larina, S.V. Cherepanova, T.S. Clazneva, V.V. Kozik, *Catalysis Communications*, 89, 64-68 (2017).
 17. A.A. Buzaev, A.O. Rogacheva, V.V. Zharkova, V.V. Kozik, *Journal of Physics: Conference Series* 1989 (2021). DOI: 10.1088/1742-6596/1989/1/012019

© **Е. С. Лютова** – канд. техн. наук; доцент каф. Неорганической химии (НХ) Химического факультета, Национальный исследовательский томский государственный университет (НИТГУ), Томск, Россия, lyutova.tsu@mail.ru; **Д. К. Иванова** – студент, лаборант Химического факультета НИТГУ; **Л. П. Борило** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой НХ химического факультета НИТГУ; **А. А. Бузаев** – кандидат химических наук, ст. науч. сотрудник химического факультета НИТГУ.

© **E. S. Lyutova** – PhD (Technical Sci.), Associate professor of the Department of Inorganic Chemistry (IC), Faculty of Chemistry, National Research Tomsk State University (NRTSU), Tomsk, Russia, lyutova.tsu@mail.ru; **D. K. Ivanova** – Student of the IC department, Faculty of Chemistry, NRTSU; **L. P. Borilo** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor, Head of the IC department, Faculty of Chemistry, NRTSU; **A. A. Buzaev** – PhD (Chemical Sci.), Senior Researcher, Faculty of Chemistry, NRTSU.

Дата поступления рукописи в редакцию – 09.02.26.
 Дата принятия рукописи в печать – 26.02.26.