

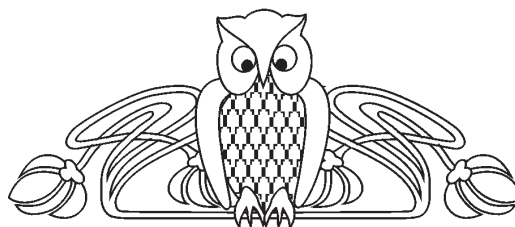


Научная статья

УДК 577.344.3.579.61.666.1.056

<https://doi.org/10.18500/1816-9775-2021-21-2-185-189>

## Фотокаталитическое действие светодиодного излучения (405 нм) и новых 3D-наноконпозитов $Al_2O_3$ на рост *Staphylococcus aureus*



А. В. Светлакова, Е. С. Тучина ✉

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, Саратов, 410012, ул. Астраханская, д. 83

Светлакова Анна Владимировна, студент кафедры биохимии и биофизики, [anna5vetlakova@yandex.ru](mailto:anna5vetlakova@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-2293-5849>

Тучина Елена Святославна, кандидат биологических наук, доцент кафедры биохимии и биофизики, [kliany@rambler.ru](mailto:kliany@rambler.ru), <https://orcid.org/0000-0003-4498-2846>

**Аннотация.** Прогрессирующий рост устойчивости бактерий к антибиотическим препаратам требует создания высокоэффективных наноматериалов для борьбы с резистентными штаммами бактерий в условиях медицинских учреждений. Оксид алюминия является стабильным нетоксичным полупроводниковым материалом, однако фотокаталитические свойства его модификаций в отношении микроорганизмов недостаточно изучены. В данном исследовании были использованы новые 3D-компози́ты оксигидроксида алюминия ( $Al_2O_3 \times nH_2O$ ) в трех модификациях ( $\gamma$ ,  $\alpha$  и  $\theta$ ), представляющие собой сетку из 150-нм наноприл. Оценку фотокаталитических антибактериальных свойств компози́тов осуществляли на музейном штамме *S. aureus* 209 P. Было показано, что в сочетании с фиолетовым светодиодным излучением (405 нм, 17 мВт/см<sup>2</sup>) исследуемые компози́ты оказывают существенное подавление роста бактерий (выживаемость не превышала 11–27%), при этом наилучший результат показал образец, содержащий  $\gamma$ - $Al_2O_3$ .

**Ключевые слова:** фотокаталитическое воздействие, нанопокрyтия, наночастицы, наноконпозиты,  $Al_2O_3$ , фиолетовый свет, 405 нм, микроорганизмы, *Staphylococcus aureus*

**Благодарности:** Авторы выражают признательность сотрудникам лаборатории новых физико-химических проблем ИФХЭ имени А. Н. Фрумкина (Москва, Россия) за предоставленные образцы 3D-наноконпозитов и лично главному научному сотруднику доктору физико-химических наук А. Н. Ходану, сотруднику кафедры оптики и биофотоники СГУ им. Н. Г. Чернышевского (Саратов, Россия) Л. Е. Долотову за помощь при проведении измерений и настройке оборудования.

**Для цитирования:** Светлакова А. В., Тучина Е. С. Фотокаталитическое действие светодиодного излучения (405 нм) и новых 3D-наноконпозитов  $Al_2O_3$  на рост *Staphylococcus aureus* // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2021. Т. 21, вып. 2. С. 185–189. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2021-21-2-185-189>

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

Article

<https://doi.org/10.18500/1816-9775-2021-21-2-185-189>

**Photocatalytic effect of led radiation (405 nm) and new  $Al_2O_3$  3D-nanocomposites on the growth of *Staphylococcus aureus***

А. V. Svetlakova, E. S. Tuchina ✉

Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

Anna V. Svetlakova, [anna5vetlakova@yandex.ru](mailto:anna5vetlakova@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-2293-5849>

Elena S. Tuchina, [kliany@rambler.ru](mailto:kliany@rambler.ru), <https://orcid.org/0000-0003-4498-2846>

**Abstract.** The progressive growth of bacterial resistance to antibiotic drugs requires the creation of highly efficient nanomaterials. Aluminum oxide is a stable non-toxic semiconductor material; however, the photocatalytic properties of its modifications in relation to microorganisms are not well understood. In this study, we used new 3D composites of aluminum oxyhydroxide ( $Al_2O_3 \times nH_2O$ ) in three modifications ( $\gamma$ ,  $\alpha$  and  $\theta$ ), which are a mesh of 150 nm nanofibrils. The assessment of the photocatalytic antibacterial properties of the composites



was carried out on the museum strain *S. aureus* 209 P. It was shown that, in combination with violet LED radiation (405 nm, 17 mW/cm<sup>2</sup>), the composites under study significantly suppress bacterial growth (from 65 to 89%), with the sample containing  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> showing the best result.

**Keywords:** photocatalytic effect, nanocoatings, nanoparticles, nanocomposites, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, violet light, 405 nm, microorganisms, *Staphylococcus aureus*

**Acknowledgements:** The authors are grateful to the staff of the Laboratory of New Physicochemical Problems (IP named after A. N. Frumkin, Moscow, Russia) for the provided samples of 3D nanocomposites and personally to the chief researcher D. Sci. Anatoliy N. Khodan, to Associate Professor of the Department of Optics and Biophotonics (Saratov State University, Russia) Leonid E. Dolotov for help in carrying out measurements and setting up the equipment.

**For citation:** Svetlakov A. V., Tuchina E. S. Photocatalytic effect of led radiation (405 nm) and new Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 3D-nanocomposites on the growth of *Staphylococcus aureus*. *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2021, vol. 21, iss. 2, pp. 185–189. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2021-21-2-185-189>

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

## Введение

В последние десятилетия применение наноматериалов заметно возросло: их используют в пищевой, косметической промышленности, в медицине, строительстве [1, 2].

Алюминий и его оксиды – это стабильные, нетоксичные материалы, безвредные даже при высоких концентрациях и при длительном воздействии на клетки [3–5]. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> является полупроводником, чем обусловлены его фотокалалитические свойства [6]. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> существует в нескольких модификациях, фотокалалитические и цитоксические способности которых изучены еще не в полной мере [7]. Наиболее применяемым в фотокалализе является  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [8]. Для повышения фотокалалитической активности Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> легируют с другими материалами, такими как серебро [9], никель [10], диоксид титана [11], азот [12], платина [13], что помогает добиться оптимальной ширины запрещенной зоны и рекомбинации электронов.

Современные способы синтеза наноструктур позволяют получать в основном их дисперсные системы, склонные к агрегации. Это обстоятельство значительно снижает возможности применения наноматериалов и делает необходимым поиск методов синтеза новых видов наноструктур, отвечающих всем требованиям современной науки, а также обладающих физико-химической стабильностью. Одним из таких материалов являются 3D-композитные наноструктуры, обладающие необходимыми качествами [14].

Создание 3D-композитов (НК) на основе пористого монолита оксигидроксида алюминия позволяет получить необходимые биоинженерные свойства: заданную величину открытой пористости, а также возможность адаптировать структурные параметры и прочностные свойства материалов [14–17].

Представляет интерес изменение фотокалалитических свойств НК на основе из трех

модификаций Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при облучении фиолетовым (405 нм) светом малой мощности и реакция на это комбинированное действие клеток стандартного штамма *S. aureus* 209 P.

## Материалы и методы

Объектом исследования служил музейный штамм *S. aureus* 209 P, полученный из коллекции культур ГИСК им. Л. А. Тарасевич (Москва, Россия). Использовали 24-ч культуры, выращенные на универсальной плотной питательной среде (ГРМ-агар, Обнинск, Россия) при 37°C.

В качестве источника излучения был выбран светодиод с максимальной длиной волны 405 нм, плотностью мощности 17 мВт/см<sup>2</sup>. Экспозиция излучения составляла 5, 10, 15 и 30 мин, что соответствовало дозам излучения 5.1, 10.2, 15.3, 30.6 Дж/см<sup>2</sup>.

Композитные 3D-наноструктуры на основе  $\gamma$ ,  $\alpha$  и  $\theta$ -модификаций Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (средняя длина нановолокон ~150 нм, удельная площадь материала 115 м<sup>2</sup>/г) были произведены в Институте физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина по оригинальной технологии [14–16]. Образцы толщиной 2 мм помещали в ячейки 24-луночного полистирольного стерильного планшета для дальнейшей работы.

Для тестирования антимикробных свойств НК суспензию микроорганизмов объемом 1 мл (10<sup>3</sup> м.к./мл) добавляли в лунку, содержащую образец НК, оставляли в темноте на 30 мин для оценки темновой токсичности. Затем суспензию подвергали действию излучения. Контрольные образцы оставляли вне действия света на все время эксперимента. Облученные и необлученные суспензии высевали на поверхность плотной питательной среды в чашки Петри.

Учет результатов осуществляли путем подсчета КОЕ через 24–48 ч после инкубации при 37° С. В качестве контроля принимали значения колониеобразующей способности бактериальных клеток, не подвергавшихся облучению и не об-



работанных нанокompозитами. Эксперименты проводились в пятикратной повторности, данные обрабатывали с помощью пакета программ Statistica base (StatSoft, USA).

### Результаты и их обсуждение

Новые 3D-композиты  $Al_2O_3$  показали себя как перспективный антимикробный материал. При проверке бактериостатического действия света длиной волны 405 нм было выявлено, что

выживаемость не превышает 69% при максимальном времени воздействия (рис. 1).

При проверке цитотоксического действия НК без доступа света установлено, что наибольшее повреждающее действие (сокращение численности на 33% по сравнению с контролем) оказывают образцы, содержащие  $\gamma-Al_2O_3$ . Выживаемость микробных клеток для образцов, содержащих  $\alpha-Al_2O_3$  и  $\theta-Al_2O_3$ , составляла 90 и 81% соответственно (см. рис. 1).

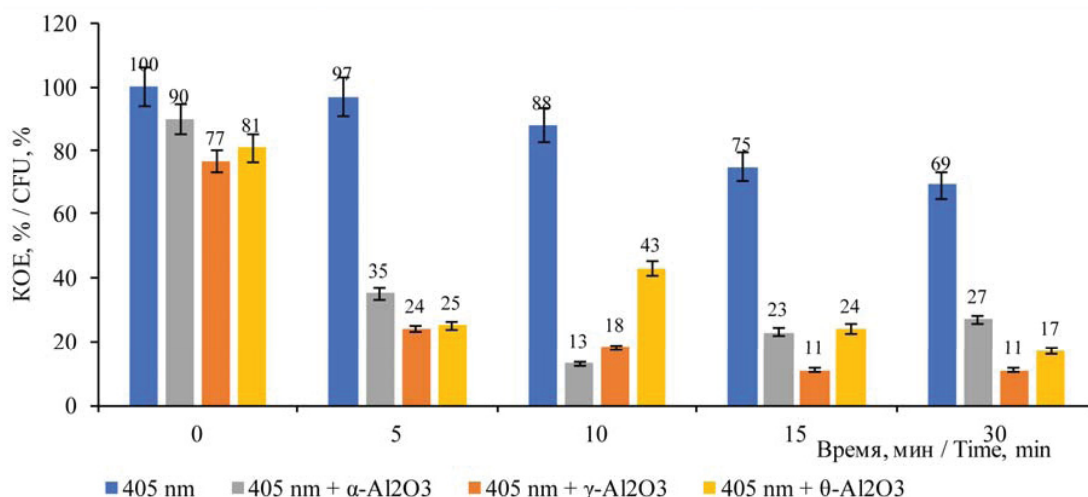


Рис. 1. Влияние фиолетового светодиодного излучения (405 нм, 17 мВт/см<sup>2</sup>) и нанокompозитов на выживаемость *S. aureus* 209 P (цвет online)

Fig. 1. Effect of LED light (405 nm, 17 mW/cm<sup>2</sup>) and nanocomposites on *S. aureus* 209 P (color online)

Показано, что фотокаталитические свойства НК разных модификаций также отличаются. Выявленный подавляющий эффект отмечен уже после 5 мин воздействия: для  $\alpha-Al_2O_3$  НК – выживаемость составила 35%, для  $\gamma-Al_2O_3$  – 24%, и для  $\theta-Al_2O_3$  – 25%. В целом, наименьшую активность показал образец  $\theta$ -модификации, вызвавший снижение КОЕ до 17% после 30 мин облучения. Самым активным оказался образец  $\gamma-Al_2O_3$ , снижение численности популяции микроорганизмов при его использовании происходило до 11% (см. рис. 1).

Нанопрепараты на основе  $Al_2O_3$  имеют ряд преимуществ по сравнению с другими оксидами металлов, в первую очередь это низкая цитотоксичность в отношении клеток человека даже при длительном воздействии [3, 17]. Лишь небольшой ряд работ посвящен изучению их фотокаталитических свойств [4, 9–11, 13, 18], которые представляют несомненный практический интерес ввиду расширения сфер применения фотокатализа (например, для самоочистки строительных и отделочных материалов, для создания

антимикробных фильтров и покрытий и т.п.).

Индукцированная оптическим излучением цитотоксичность НК  $Al_2O_3$ , по всей вероятности, связана с фотокаталитическими свойствами данных материалов [9, 19, 20]. Теоретическая схема возможных повреждений клетки стафилококка представлена на рис. 2. Фотокаталитические эффекты возникают в результате окислительно-восстановительных реакций, протекающих с участием фотоиндуцированных электронов ( $e^-$ ) и дырок ( $h^+$ ). Антимикробное действие данных процессов может быть обусловлено возникновением ряда окислителей в водном пространстве «наночастицы – клеточная стенка». Большое значение играет присутствие растворенного  $O_2$ , который преобразуется в супероксид-анион-радикал ( $\bullet O_2^-$ ), пероксид водорода ( $H_2O_2$ ), синглетный кислород ( $^1O_2$ ) и гидроксильный радикал ( $\bullet OH$ ) [19, 20]. Повреждение начинается с компонентов клеточной стенки, затрагивает мембранные транспортные белки и может привести к окислению липидов, внутриклеточных белков и ДНК.

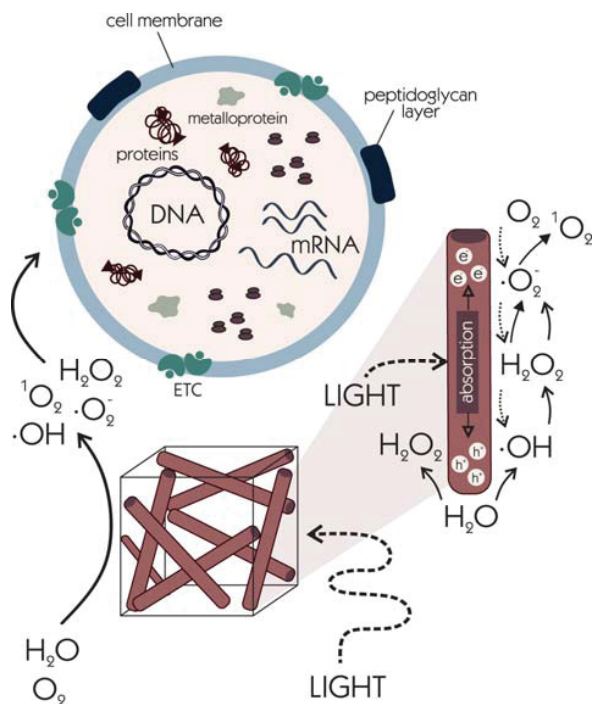


Рис. 2. Схема протекания фотокаталитических процессов с участием нанокompозитов  $Al_2O_3$   
Fig. 2. Diagram of photocatalytic processes with the participation of nanocomposites  $Al_2O_3$

На основании полученных результатов можно заключить, что наноструктурный  $Al_2O_3$  является перспективным антибактериальным материалом. При различной комбинации модификаций  $Al_2O_3$  можно получить нанокompозиты для тех или иных целей, обладающие различной токсичностью и фотокаталитической активностью. Наиболее активным оказался образец  $Al_2O_3$   $\gamma$ -модификации, который показал самые высокие результаты как при проверке темновой токсичности, так и в ходе фотокаталитического воздействия.

### Список литературы

1. Singh R., Smitha M. S., Singh S. P. The role of nanotechnology in combating multi-drug resistant // J. Nanosci. Nanotechnol. 2014. Vol. 14, № 7. P. 4745–4756.
2. Vance M. E., Kuiken T., Vejerano E. P., McGinnis S. P., Hochella M. F., Rejeski D., Hull M. S. Nanotechnology in the real world: redeveloping the nanomaterial consumer products inventory // Beilstein J. Nanotechnol. 2015. Vol. 6. P. 1769–1780. DOI: 10.3762/bjnano.6.181
3. Kim I.-S., Baek M., Choi S.-J. Comparative Cytotoxicity of  $Al_2O_3$ ,  $CeO_2$ ,  $TiO_2$  and  $ZnO$  Nanoparticles to Human Lung Cells // J. of Nanosci. and Nanotech. 2010. Vol. 10, № 5. P. 3453–3458. DOI: 10.1166/jnn.2010.2340
4. Siroka P., Augustyniak A., Cendrowski K., Nawrotek P. Antimicrobial Activity of  $Al_2O_3$ ,  $CuO$ ,  $Fe_3O_4$ , and  $ZnO$

Nanoparticles in Scope of Their Further Application in Cement-Based Building Materials // Nanomaterials. 2018. Vol. 8, № 4. P. 212–220. DOI: 10.3390/nano8040212

5. Prabhakar P. V., Reddy U. A., Singh S. P., Balasubramanyam A., Rahman M. F., Indu Kumari S., Agawane S. B., Murty U. S. N., Grover P., Mahboob M. Oxidative stress induced by aluminum oxide nanomaterials after acute oral treatment in Wistar rats // J. Appl. Toxicol. 2015. Vol. 32. P. 436–445. DOI: 10.1002/jat.1775
6. Priyanka G., Ciara B., Ailish B., Suresh C. P. Antimicrobial activity of photocatalysts: Fundamentals, mechanisms, kinetics and recent advances // Applied Catalysis B: Environmental. 2018. Vol. 225. P. 51–75. DOI: 10.1016/j.apcatb.2017.11.018
7. Levin I., Brandon D. Metastable Alumina Polymorphs: Crystal Structures and Transition Sequences // J. of the Amer. Ceramic Society. 2005. Vol. 81, iss. 8. P. 1995–2012. DOI: 10.1111/j.1151-2916.1998.tb02581.x
8. Rozita Y., Brydson R., Scott A. An investigation of commercial gamma- $Al_2O_3$  nanoparticles // J. of Phys.: Conference Series. 2009. Vol. 241. P. 1–5.
9. Lozhkomoev A. S., Kazantsev S. O., Pervikov V., Fomenko N., Gotman I. A new approach to production of antimicrobial  $Al_2O_3$ -Ag nanocomposites by electrical explosion of two wires // Materials Research Bulletin. 2019. Vol. 2019. P. 1–7.
10. Li B., Yuan H., Yi B., Zhang Y. Fabrication of the composite nanofibers of  $NiO/\gamma-Al_2O_3$  for potential application in photocatalysis // Ceramics International. 2016. Vol. 42, № 15. P. 17405–17409.
11. Parham S., Wicaksono D., Nur H. A proposed mechanism of action of textile/ $Al_2O_3$ - $TiO_2$  bimetal oxide nanocomposite as an antimicrobial agent // The Journal of the Textile Institute. 2018. Vol. 110, № 5. P. 791–798
12. Jia Z., Nadochenko V., Radzig M. A., Khmel I. A., Zavlilgelsky G., Azouani R., Kanaev A. Antibacterial activity of monolayer nanoparticulate AgN-(titanium-oxo-alkoxy) coatings // Mechanics & Industry. 2016. Vol. 17, № 5. P. 1–6.
13. Jie L., Changcheng L., Aizeng M., Zhijian D., Huidong Z. Influence of Dechlorination Temperature on Propane Dehydrogenation over  $Pt-\theta-Al_2O_3$  // China Petroleum Processing and Petrochemical Technology. 2018. Vol. 20, № 4. P. 1–7.
14. Khodan A. N., Nguyen T. H. N., Esaulkov M., Kiselev R., Amamra M., Vignes J.-L., Kanaev A. Porous monoliths consisting of aluminum oxyhydroxide nanofibrils : 3D structure, chemical composition, and phase transformations in the temperature range 25–1700 °C // J. Nanopart. Res. 2018. Vol 2, iss. 7. DOI: 10.1007/s11051-018-4285-4
15. Khodan A. N., Baranchikov A. E., Utochnikova V. V., Simonenko N. P., Beltiukov A. N., Petukhov D. I., Kanaev A., Ivanov V. K. Superhydrophobic and luminescent highly porous nanostructured alumina monoliths modified with tris(8-hydroxyquinolinato)aluminium // Microporous and Mesoporous Materials. 2019. Vol. 293. P. 291–302.
16. Tartari A., Amamra M., Nguyen T. H. N., Piat M., Favero I., Ducci S., Khodan A., Boinovich L. B., Emelyanenko A. M., Kanaev A., Leo G. Ultra-porous alumina for applications in microwave planar antennas // Advanced Device Materials. 2016. Vol. 1, № 4. P. 93–99.
17. Köerich J. S., Diego José Nogueira D. J., Vaz V. P., Carmen Simioni C., Da Silva M. L. N., Ouriques L. C.,





- Vicentini D. S., Matias W. G. Toxicity of binary mixtures of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{ZnO}$  nanoparticles toward fibroblast and bronchial epithelium cells // *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*. 2020. P. 1. DOI: 10.1080/15287394.2020.1761496
18. Ansari M. A., Khan H. M., Alzohairy M. A., Jalal M., Ali S. G., Pal R., Mussarat J. Green synthesis of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticles and their bactericidal potential against clinical isolates of multi-drug resistant *Pseudomonas aeruginosa* // *World J. Microbiol. Biotechnol.* 2014. Vol. 31. P. 153. DOI: 10.1007/s11274-014-1757-2
  19. Bouslama M., Amamra M. C., Jia Z., Amar M. B., Brinza O., Chhor K., Abderrabba M., Vignes J.-L., Kanaev A. Nanoparticulate  $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  Photocatalytic Media: Effect of Particle Size and Polymorphism on Photocatalytic Activity // *ACS Catal.* 2012. Vol. 2, № 9. P. 1884. DOI: 10.1021/cs300033y
  20. Nosaka Y., Nosaka A. Y. Generation and Detection of Reactive Oxygen Species in Photocatalysis // *Chem. Rev.* 2017. Vol. 117. P. 11302–11336. DOI: 10.1021/acs.chemrev.7b00161
- References**
1. Singh R., Smitha M. S., Singh S. P. The role of nanotechnology in combating multi-drug resistant. *J. Nanosci. Nanotechnol.*, 2014, vol. 14, no. 7, pp. 4745–4756.
  2. Vance M. E., Kuiken T., Vejerano E. P., McGinnis S. P., Hochella M. F., Rejeski D., Hull M. S. Nanotechnology in the real world: redeveloping the nanomaterial consumer products inventory. *Beilstein J. Nanotechnol.*, 2015, vol. 6, pp. 1769–1780. DOI: 10.3762/bjnano.6.181
  3. Kim I.-S., Baek M., Choi S.-J. Comparative Cytotoxicity of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CeO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$  and  $\text{ZnO}$  Nanoparticles to Human Lung Cells. *J. of Nanosci. and Nanotech.*, 2010, vol. 10, no. 5, pp. 3453–3458. DOI: 10.1166/jnn.2010.2340
  4. Siroka P., Augustyniak A., Cendrowski K., Nawrotek P. Antimicrobial Activity of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CuO}$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , and  $\text{ZnO}$  Nanoparticles in Scope of Their Further Application in Cement-Based Building Materials. *Nanomaterials*, 2018, vol. 8, no. 4, pp. 212–220. DOI: 10.3390/nano8040212
  5. Prabhakar P. V., Reddy U. A., Singh S. P., Balasubramanyam A., Rahman M. F., Indu Kumari S., Agawane S. B., Murty U. S. N., Grover P., Mahboob M. Oxidative stress induced by aluminum oxide nanomaterials after acute oral treatment in Wistar rats. *J. Appl. Toxicol.*, 2015, vol. 32, pp. 436–445. DOI: 10.1002/jat.1775
  6. Priyanka G., Ciara B., Ailish B., Suresh C. P. Antimicrobial activity of photocatalysts: Fundamentals, mechanisms, kinetics and recent advances. *Applied Catalysis B: Environmental.*, 2018, vol. 225, pp. 51–75. DOI: 10.1016/j.apcatb.2017.11.018
  7. Levin I., Brandon D. Metastable Alumina Polymorphs: Crystal Structures and Transition Sequences. *J. of the Amer. Ceramic Society*, 2005, vol. 81, iss. 8, pp. 1995–2012. DOI: 10.1111/j.1151-2916.1998.tb02581.x
  8. Rozita Y., Brydson R., Scott A. An investigation of commercial gamma- $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticles. *J. of Phys.: Conference Series*, 2009, vol. 241, pp. 1–5.
  9. Lozhkomoev A. S., Kazantsev S. O., Pervikov V., Fomenko N., Gotman I. A new approach to production of antimicrobial  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Ag}$  nanocomposites by electrical explosion of two wires. *Materials Research Bulletin*, 2019, vol. 2019, pp. 1–7.
  10. Li B., Yuan H., Yi B., Zhang Y. Fabrication of the composite nanofibers of  $\text{NiO}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  for potential application in photocatalysis. *Ceramics International*, 2016, vol. 42, no. 15, pp. 17405–17409.
  11. Parham S., Wicaksono D., Nur H. A proposed mechanism of action of textile/ $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  bimetal oxide nanocomposite as an antimicrobial agent. *The Journal of the Textile Institute*, 2018, vol. 110, no. 5, pp. 791–798
  12. Jia Z., Nadtochenko V., Radzig M. A., Khmel I. A., Zavlilgelsky G., Azouani R., Kanaev A. Antibacterial activity of monolayer nanoparticulate  $\text{AgN}$ -(titanium-oxo-alkoxy) coatings. *Mechanics & Industry*, 2016, vol. 17, no. 5, pp. 1–6.
  13. Jie L., Changcheng L., Aizeng M., Zhijian D., Huidong Z. Influence of Dechlorination Temperature on Propane Dehydrogenation over  $\text{Pt-}\theta\text{-Al}_2\text{O}_3$ . *China Petroleum Processing and Petrochemical Technology*, 2018, vol. 20, no. 4, pp. 1–7.
  14. Khodan A. N., Nguyen T. H. N., Esaulkov M., Kiselev R., Amamra M., Vignes J.-L., Kanaev A. Porous monoliths consisting of aluminum oxyhydroxide nanofibrils: 3D structure, chemical composition, and phase transformations in the temperature range 25–1700 °C. *J. Nanopart. Res.*, 2018, vol. 2, iss. 7. DOI: 10.1007/s11051-018-4285-4
  15. Khodan A. N., Baranchikov A. E., Utochnikova V. V., Simonenko N. P., Beltiukov A. N., Petukhov D. I., Kanaev A., Ivanov V. K. Superhydrophobic and luminescent highly porous nanostructured alumina monoliths modified with tris(8-hydroxyquinolino)aluminium. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2019, vol. 293, pp. 291–302.
  16. Tartari A., Amamra M., Nguyen T. H. N., Piat M., Favero I., Ducci S., Khodan A., Boinovich L. B., Emelyanenko A. M., Kanaev A., Leo G. Ultra-porous alumina for applications in microwave planar antennas. *Advanced Device Materials*, 2016, vol. 1, no. 4, pp. 93–99.
  17. Köerich J. S., Diego José Nogueira D. J., Vaz V. P., Carmen Simioni C., Da Silva M. L. N., Ouriques L. C., Vicentini D. S., Matias W. G. Toxicity of binary mixtures of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{ZnO}$  nanoparticles toward fibroblast and bronchial epithelium cells. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 2020, pp. 1. DOI: 10.1080/15287394.2020.1761496
  18. Ansari M. A., Khan H. M., Alzohairy M. A., Jalal M., Ali S. G., Pal R., Mussarat J. Green synthesis of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticles and their bactericidal potential against clinical isolates of multi-drug resistant *Pseudomonas aeruginosa*. *World J. Microbiol. Biotechnol.*, 2014, vol. 31, pp. 153. DOI: 10.1007/s11274-014-1757-2
  19. Bouslama M., Amamra M. C., Jia Z., Amar M. B., Brinza O., Chhor K., Abderrabba M., Vignes J.-L., Kanaev A. Nanoparticulate  $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  Photocatalytic Media: Effect of Particle Size and Polymorphism on Photocatalytic Activity. *ACS Catal.*, 2012, vol. 2, no. 9, pp. 1884. DOI: 10.1021/cs300033y
  20. Nosaka Y., Nosaka A. Y. Generation and Detection of Reactive Oxygen Species in Photocatalysis. *Chem. Rev.*, 2017, vol. 117, pp. 11302–11336. DOI: 10.1021/acs.chemrev.7b00161

Поступила в редакцию 26.01.21, после рецензирования 08.02.21, принята к публикации 10.02.21  
 Received 26.01.21, revised 08.02.21, accepted 10.02.21