

ПОЛУЧЕНИЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ ЦИНКСОДЕРЖАЩИХ ПОЛИФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛАХ

К.А. Ерзунов, О.И. Одинцова, А.В. Трегубов, М.Д. Ильичева, А.А. Липина

Константин Андреевич Ерзунов (ORCID 0000-0002-5632-1394)*, Ольга Ивановна Одинцова (ORCID 0000-0001-5002-2601), Андрей Васильевич Трегубов, Мария Дмитриевна Ильичева, Анна Андреевна Липина (ORCID 0000-0002-1259-9351)

Кафедра химической технологии волокнистых материалов, Ивановский химико-технологический университет, пр. Шереметевский, 7, Иваново, Российская Федерация, 153000

E-mail: erzunovk@mail.ru*

В настоящей работе описывается синтез наноразмерных частиц оксида цинка, их нанесение на текстильную основу, а также исследование антибактериальных и самоочищающихся свойств готового функционального материала. В качестве прекурсоров синтеза наночастиц были выбраны растворы хлорида и ацетата цинка. Золь-гель методом были получены наночастицы ZnO из ацетата цинка путем взаимодействия ацетата с концентрированным гидроксидом натрия (NaOH). Из образовавшегося золя частицы осаждали раствором этилового спирта. Второй способ предполагал осаждение частиц концентрированным NaOH при интенсивном перемешивании и их прокаливание при высокой температуре. Проведена оптимизация температурно-технических параметров процессов. Показано, что размер частиц в первом случае составил порядка 400-650 нм, во втором – 500-800 нм. На основе синтезированных частиц получен ряд печатных композиций. В качестве загущающего агента применяли метилцеллюлозу. Для функциональной отделки были выбраны хлопчатобумажный и хлопкополиэфирный текстильные материалы. Полученные дисперсии наносили на образцы отбеленной хлопчатобумажной ткани методом печати с последующей сушкой при 90-100 °С до высыхания и термофиксацией при 180-190 °С. Установлено, что обработанные текстильные материалы приобретают повышенные антибактериальные свойства по отношению к грамположительным и грамотрицательным группам бактерий. Зона задержки роста бактерий составила 8-9 мм. Исследование самоочищающихся свойств полученных тканей показало, что сформированное покрытие позволяет добиться значительного обесцвечивания капли красителя уже после 1 ч УФ-облучения. Покрытие на основе наночастиц цинка позволяет повысить степень фотокаталитической деструкции загрязнителя на поверхности обработанного материала в 4,5 раза.

Ключевые слова: наночастицы оксида цинка, функциональный текстиль, антимикробные покрытия, золь-гель метод

THE OBTAINING NANOSIZED ZINC-CONTAINING FUNCTIONAL COATINGS ON TEXTILE MATERIALS

K.A. Erzunov, O.I. Odintsova, A.V. Tregubov, M.D. Plyicheva, A.A. Lipina

Konstantin A. Erzunov (ORCID 0000-0002-5632-1394)*, Olga I. Odintsova (ORCID 0000-0001-5002-2601), Andrey V. Tregubov, Maria D. Plyicheva, Anna A. Lipina (ORCID 0000-0002-1259-9351)

Department of Chemical Technology of Fibrous Materials, Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Sheremetevskiy ave., 7, Ivanovo, 153000, Russia

E-mail: erzunovk@mail.ru*

This paper describes the synthesis of nanosized zinc oxide particles, their application to a textile base, as well as the study of the antibacterial and self-cleaning properties of the finished functional material. Zinc chloride and zinc acetate solutions were chosen as precursors for the synthesis of nanoparticles. ZnO nanoparticles were obtained by the sol-gel method from zinc acetate by reacting the acetate with concentrated sodium hydroxide (NaOH). Particles were precipitated from the resulting sol with an ethanol solution. The second method involved precipitation of particles with concentrated NaOH under vigorous stirring and their calcination at high temperature. Optimization of temperature-technical parameters of processes has been carried out. It is shown that the particle size in the first case was about 400-650 nm, in the second – 500-800 nm. Based on the synthesized particles, a number of printed compositions have been obtained. Methylcellulose was used as a thickening agent. For functional finishes, cotton and cotton-polyester textile materials were chosen. The resulting dispersions were applied to samples of bleached cotton fabric by printing, followed by drying at 90-100 °C until dry and heat setting at 180-190 °C. It has been established that the treated textile materials acquire increased antibacterial properties in relation to gram-positive and gram-negative groups of bacteria. The bacterial growth inhibition zone was 8-9 mm. The study of the self-cleaning properties of the obtained fabrics showed that the formed coating allows to achieve a significant discoloration of the dye drop already after 1 hour of UV irradiation. The coating based on zinc nanoparticles makes it possible to increase the degree of photocatalytic destruction of the pollutant on the surface of the treated material by 4.5 times.

Key words: zinc oxide nanoparticles, functional textiles, antimicrobial coatings, sol-gel method

Для цитирования:

Ерзунов К.А., Одинцова О.И., Трегунов А.В., Ильичева М.Д., Липина А.А. Получение наноразмерных цинксо-держущих полифункциональных покрытий на текстильных материалах. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2023. Т. 66. Вып. 9. С. 89–95. DOI: 10.6060/ivkkt.20236609.6825.

For citation:

Erzunov K.A., Odintsova O.I., Tregubov A.V., Ilyicheva M.D., Lipina A.A. The obtaining nanosized zinc-containing functional coatings on textile materials. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 9. P. 89–95. DOI: 10.6060/ivkkt.20236609.6825.

ВВЕДЕНИЕ

Нанотехнологии – это горячая точка исследований в современном материаловедении [1-3]. В этой области рассматривается синтез, характеристика и исследование материалов в нанометровом диапазоне размеров частиц. По сравнению с остальными материалами, наноразмерные препараты проявляют новые физико-химические и биологические свойства [4-8]. Основными преимуществами наномодификаторов служат их специальные свойства, а также возможность за счет небольшого размера охватывать большую площадь материала носителя [9], поэтому на их основе получают эффективные препараты для создания специальных покрытий для различных материалов. В частности, нанесенные на текстильные материалы, такие покрытия способны придать тканям новые специальные возможности: антимикробные и гидрофобные свойства, способность к самоочищению, терморегулирующие свойства. К функциональному текстилю можно отнести костюмы работников атомных электростанций, специальных военных частей, космических станций.

С этой целью в процессах нанесения используются различные классические и современные органические, органо-неорганические гибридные и неорганические соединения [10]. Среди последних наночастицы ZnO (ZnO-НЧ) уже рекомендовали себя как химический агент для функционализации текстиля, благодаря своим уникальным физическим и химическим свойствам, экологичности, биосовместимости и низкой цене [11].

Высокая фотокаталитическая активность ZnO-НЧ и химическая стабильность при воздействии УФ-излучения позволяют частицам ZnO придать текстильным материалам наиболее эффективные самоочищающиеся, антимикробные и УФ-защитные свойства [12, 13].

При облучении частицы ZnO происходит фотовозбуждение и в результате электроны из валентной зоны выбиваются, а на их месте остаются положительно заряженные «дырки». Таким образом, индуцируется появление электронно-дырочных пар, которое приводит к образованию активных радикалов, способных взаимодействовать с органическими молекулами. За счет этого мате-

риал приобретает способность к деструкции органических загрязнителей или уничтожению патогенных микроорганизмов (рис. 1) [14]. Причем в ряде работ сообщается, что наноразмерный оксид цинка способен проявлять антимикробные свойства и без облучения [15]. Предполагается, что при проникновении внутрь клетки оксид цинка способен приводить к нарушению ее жизнедеятельности и последующей гибели. По другой теории разрушение мембраны происходит за счет электростатических сил. Поскольку внешняя сторона клеток бактерий заряжена положительно и частицы в растворе также несут частичный положительный заряд, при их взаимодействии происходит разрыв клеточной стенки бактерии.

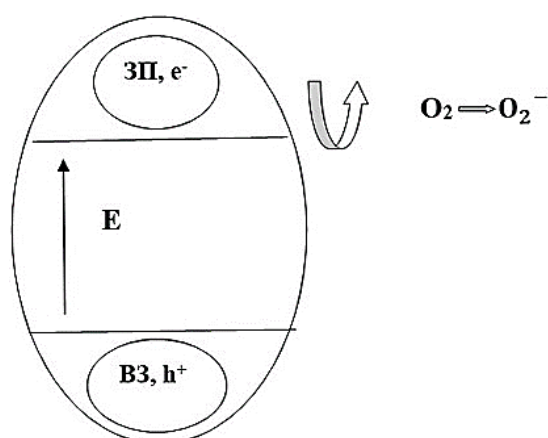


Рис. 1. Механизм фотокаталитического действия наноразмерного ZnO: ЗП – зона проводимости, ВЗ – валентная зона, E – энергия возбуждения

Fig. 1. Mechanism of photocatalytic action of nanosized ZnO: ЗП – the conduction band, ВЗ – valence band, E – the excitation energy

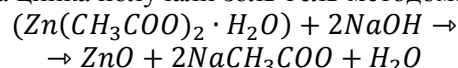
Уникальные свойства и универсальность ZnO открывают возможности использования многих методов синтеза наноструктур оксида цинка. НЧ-ZnO можно синтезировать различными методами, контролируя параметры синтеза: золь-гель метод, метод осаждения, микроэмульсионный метод, гидротермальный метод и другие [16-22]. Свойства полученных наночастиц могут варьироваться в зависимости от их формы и размера, что позволяет использовать определенные методы синтеза для конкретной области применения. На форму и размер оказывают влияние химические и физические параметры синтеза, тип растворителя, прекурсоры, pH и температура. Для получения частиц с заданными свойствами, как правило, применяют химические методы, поскольку они позволяют лучше контролировать размер и морфологию частиц [23], несмотря на то, что требуют сложного

оборудования и большого количества труднодоступных реактивов.

Целью исследования являлась разработка простого и эффективного способа синтеза наночастиц оксида цинка для полифункциональной отделки текстильных материалов.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве прекурсоров синтеза наночастиц были выбраны соли цинка – хлорид цинка и ацетат цинка [24]. Наночастицы оксида цинка из ацетата цинка получали золь-гель методом:



Метод заключается в образовании прозрачного золя, из которого затем осаждают наночастицы. К водному раствору дигидрата ацетата цинка при постоянном перемешивании (600 об/мин) добавляли эквивалентное количество гидроксида натрия. К образовавшемуся золю по каплям прибавляли этанол. После реакции образовался осадок в виде мелких белых кристаллов. Осадок отфильтровывали и высушивали.

Синтезированы наночастицы цинка при использовании в качестве прекурсора хлорида цинка. Раствор хлорида цинка ZnCl_2 (0,05 M) осаждали концентрированным раствором NaOH (1M) при постоянном перемешивании на магнитной мешалке со скоростью 700 об/мин в течении 2 ч. Образовавшийся осадок отфильтровывали, высушивали и прокаливали 2 ч в муфельной печи при температуре 400 °C. После температурной обработки частицы дополнительно перетирали в ступке.

Для анализа формы и морфологии полученных из ацетата цинка наночастиц использовали метод сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Изучение поверхности полученных частиц осуществляли на сканирующем электронном микроскопе TESCAN VEGA3.

Исследование размеров наночастиц осуществляли на лазерном дифракционном анализаторе размера частиц Analysette 22 Compact.

Наночастицы наносили на хлопчатобумажную и хлопкополиэфирные материалы методом текстильной печати с использованием метилцеллюлозы в качестве загустителя.

Антибактериальные свойства отделанных текстильных материалов изучали методом дисков по отношению к кишечной палочке (*E. coli*) и эпидермальному стафилококку (*Staphylococcus epidermidis*).

Фотокаталитические свойства текстильных материалов с покрытием на основе наночастиц оксида цинка оценивали при помощи спектрофотометра YS 3010.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Форма и размер частиц оксидов оказывают существенное влияние на проявляемые ими свойства. Доказано, что частицы нанометрового размера и препараты на их основе обладают более выраженными функциональными свойствами. Небольшой размер таких частиц позволяет увеличить площадь покрытия поверхности волокнистого материала.

Из микрофотографий СЭМ частиц порошка ZnO (рис. 2) видно, что полученные образцы в большинстве обладают наноразмером порядка до 1 мкм с наличием укрупненных частиц микрометрового размера. Подобные образования могут формироваться при недостаточном перемешивании и агрегации частиц в процессе синтеза. Частицы обладают кристаллической структурой. Преобладающей формой является форма стержней и игл.

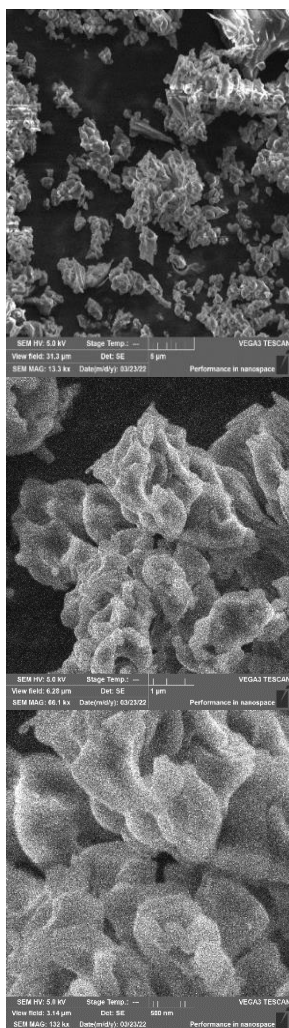


Рис. 2. СЭМ изображения наночастиц оксида цинка, полученных золь-гель методом

Fig. 2. SEM images of zinc oxide nanoparticles obtained by the sol-gel method

На рис. 3 представлен график распределения частиц по размерам.

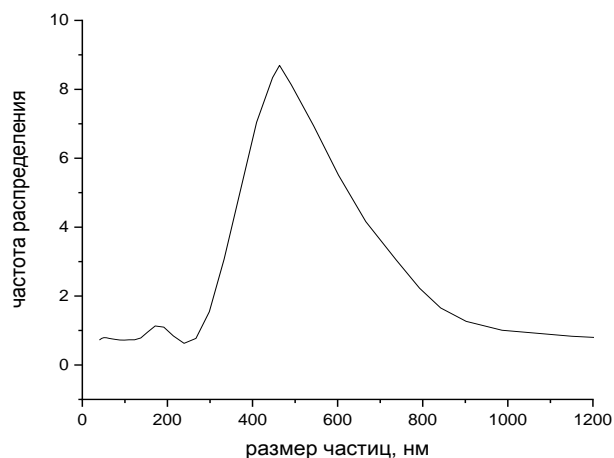


Рис. 3. График распределения частиц ZnO, синтезированного с использованием ацетата цинка в качестве прекурсора, по размерам

Fig. 3. Plot of particle size distribution of ZnO synthesized using zinc acetate as a precursor

Размер частиц ZnO, синтезированных на основе ацетата цинка, составил около 400-650 нм, что дополнительно подтверждает данные сканирующей электронной микроскопии.

На рис. 4 представлен график распределения частиц оксида цинка, полученного из ZnCl₂, по размерам.

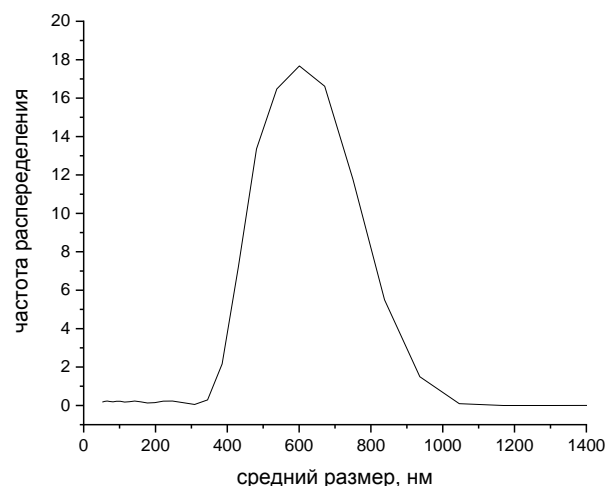


Рис. 4. График распределения частиц ZnO, синтезированных с использованием хлорида цинка в качестве прекурсора, по размерам

Fig. 4. Plot of the size distribution of ZnO particles synthesized using zinc chloride as a precursor

Показано, что синтезированные в данном случае частицы имеют большую однородность размеров в сравнении с частицами из ацетата цинка. Размер частиц составил 500-800 нм.

Эффективным способом нанесения частиц на текстильные материалы является метод текстильной печати, при котором активные частицы удерживаются на поверхности волокна за счет полимерной пленки. Покрытия формировали на образцах отбеленной хлопчатобумажной ткани и смесовом хлопкополиэфирном материале, затем подвергали сушке в шкафу в течение 10 мин при температуре 90-100 °С. Проводили фиксацию покрытия при повышенной температуре 150-160 °С 3 мин.

Как было отмечено, наночастицы ZnO и материалы на их основе обладают целым рядом свойств. Для исследования возможности использования полученных препаратов для функциональной отделки текстильных материалов провели исследование антимикробных и фотокаталитических свойств полученных материалов.

Методика изучения антибактериальной активности обработанных текстильных материалов предполагает использование двух основных групп патогенных микроорганизмов – грамположительные и грамотрицательные бактерии. Метод основан на измерении зоны задержки роста патогенных микроорганизмов вокруг исследуемого образца.



Показано, что образцы, обработанные составами, содержащими наночастицы оксида цинка, проявляют антимикробную активность по отношению к каждому типу микроорганизмов. Для кишечной палочки не наблюдается роста бактерий на поверхности образцов, таким образом, проявляется бактериостатический эффект. По отношению к эпидермальному стафилококку вокруг материала появляется зона задержки роста бактерий. Обработанные образцы хлопкополиэфирной ткани проявляют большую, по сравнению с хлопчатобумажным материалом, антимикробную активность. Зона задержки роста бактерий в данном случае для покрытия, содержащего частицы ZnO-1, составила 4 мм, для покрытия ZnO-2 – 5 мм.

Под самоочищающимися свойствами материала понимается его способность к самостоятельному удалению загрязнителей с поверхности. Существует два основных подхода к приданию текстильным материалам способности к самоочищению. Первый предполагает создание гидрофобного покрытия, что будет препятствовать контакту загрязняющих веществ с волокнистой основой. Второй подход подразумевает формирование на ткани активного слоя на основе соединений, обладающих повышенной фотокаталитической активностью, таких как оксид цинка, титана и т.д.

Таблица

Исследование антимикробной активности текстильных материалов с покрытиями на основе частиц оксида цинка, полученных из ZnCl₂ (ZnO-1) и ацетата цинка (ZnO-2)

Table. Investigation of antimicrobial activity of textile materials with coatings based on zinc oxide particles obtained from ZnCl₂ (ZnO-1) and zinc acetate (ZnO-2)

Изображения чашек Петри	Характеристика образцов	Бактериостатический эффект / бактерицидный эффект, мм
<p><i>E. coli</i></p> 	1 – хлопчатобумажная ткань, ZnO-1	Бактериостатический эффект
	2 – хлопкополиэфирная ткань ZnO-1	Бактериостатический эффект
	3 – хлопчатобумажная ткань, ZnO-2	Бактериостатический эффект
	4 – хлопкополиэфирная ткань ZnO-2	Бактериостатический эффект
<p><i>Staphylococcus epidermidis</i></p> 	1 – хлопчатобумажная ткань, ZnO-1	3
	2 – хлопкополиэфирная ткань ZnO-1	4
	3 – хлопчатобумажная ткань, ZnO-2	5
	4 – хлопкополиэфирная ткань ZnO-2	1

Для изучения фотокаталитических свойств в качестве модельного органического загрязнителя использовали краситель основной золотисто-желтый. Образцы облучали УФ-светом с длиной волны 365 нм в течение 1 ч. Изменение окраски оценивали фотометрически по разнице светлоты пятна красителя до и после облучения. Светлота (L) является показателем яркости образца и является отношением отраженного светового потока к падающему. Для светлых образцов значение светлоты стремится к 100%, для темных – к нулю. Полученные данные отражали в виде графика зависимости изменения светлоты образцов хлопкополиэфирной ткани от времени УФ-облучения (рис. 5).

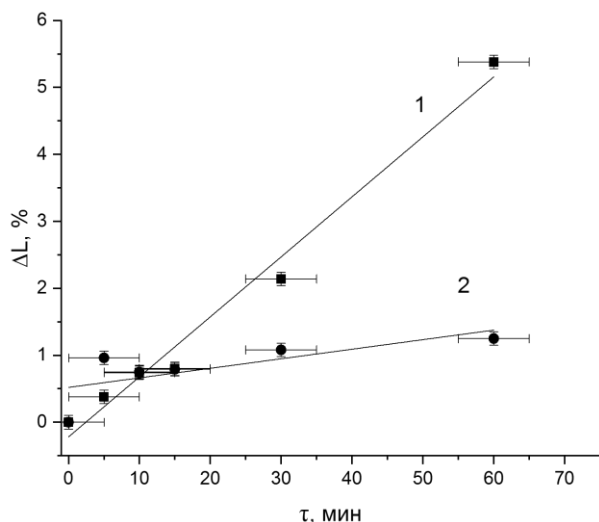


Рис. 5. Зависимость изменения светлоты образцов хлопкополиэфирной ткани от времени УФ-облучения (365 нм): 1 – образец ткани, обработанной составом на основе ZnO; 2 – необработанный материал

Fig. 5. The dependence of the change in the lightness of samples of cotton-polyester fabric on the time of UV irradiation (365 nm): 1 – fabrics sample treated with ZnO-based composition; 2 – untreated material

Самоочищающиеся свойства обработанных текстильных материалов характеризовали по степени фотокаталитической деструкции красителя на поверхности ткани и определяли, как отношение изменения светлоты капли красителя до и после облучения к исходному показателю светлоты приведенное к 100%. Степень фотокаталитического разложения красителя рассчитывали по формуле:

$$C_d = \frac{L_2 - L_1}{L_1} \cdot 100\%,$$

где L_1 , L_2 – светлота пятна красителя до и после УФ обработки соответственно.

Исходя из проведенных расчетов, установлено, что степень фотокаталитического разложения красителя на поверхности ткани, обработанной НЧ-ZnO, выше, чем у необработанной, и составила для образцов с нанесенным функциональным покрытием 5,38%, для необработанных – 1,25%. Выпадение точек на графике для необработанного материала в начале эксперимента предположительно связано с фиксацией части красителя на волокнистой поверхности при УФ-облучении.

ВЫВОДЫ

Проведен синтез частиц оксида цинка из различных прекурсоров. Для используемых методик синтеза с использованием хлорида и ацетата

цинка в качестве прекурсоров оптимизированы основные температурно-технические параметры. Размер частиц оксида цинка, синтезированных из ацетата цинка, составил 400-650 нм, из хлорида цинка – 500-800 нм. Получены образцы напечатанных хлопчатобумажных и хлопкополиэфирных тканей с покрытиями на основе ZnO.

Оценена антибактериальная активность образцов тканей, обработанных полученными наночастицами. Установлено, что модифицированная ткань приобретает повышенные антимикробные свойства. Средняя зона задержки роста микроорганизмов составила 8-9 мм.

Исследованы самоочищающиеся свойства обработанных материалов. Показано, что сформированное на текстильном материале покрытие наночастиц цинка позволяет повысить степень фотокаталитической деструкции загрязнителя на поверхности текстильного материала в 4,5 раза, таким образом, ткань приобретает повышенные самоочищающиеся свойства. Нанесенное пятно красителя заметно обесцвечивается после УФ-облучения в течение 1 ч.

Проведенный анализ специальных характеристик образцов модифицированных тканей показал, что текстильные материалы с покрытием на основе наночастиц оксида цинка приобретают полифункциональные свойства.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (номер проекта FZZW-2023-0008).

Исследование проведено с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием ИГХТУ (при поддержке Минобрнауки России, соглашение № 075-15-2021-671).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The study was carried out at financial support of Ministry of Science and High Education of RF (project N FZZW-2023-0008).

The study was carried out using the resources of the Center for Shared Use of Scientific Equipment of the ISUCT (with the support of the Ministry of Science and Higher Education of Russia, grant No. 075-15-2021-671).

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Krifa M., Prichard C.** // *J. Textile Institute*. 2020. V. 220. N 12. P. 1778-1793. DOI: 10.1080/00405000.2020.1721696.

REFERENCES

1. **Krifa M., Prichard C.** // *J. Textile Institute*. 2020. V. 220. N 12. P. 1778-1793. DOI: 10.1080/00405000.2020.1721696.

2. **Shahid-ul-Islam, Mohd S. Faqeer M.** // *Textiles Clothing Sustainability*. 2017. P. 97-115. DOI: 10.1007/978-981-10-2188-6_3.
3. **Montazer, M., Pakdel E., Behzadnia A.** // *J. Appl. Polym. Sci.* 2011. V. 121. N 6. P. 3407–3413. DOI: 10.1002/app.33858.
4. **Qi K., Wang X., Xin J.H.** // *Text. Res. J.* 2011. V. 81. P. 101. DOI: 10.1177/0040517510383618.
5. **Radetic M.** // *J. Photochem. Photobiol. C: Photochem. Rev.* 2013. V. 16. P. 62–76.
6. **Vidya P., Arulpandi I.** // *World J. Pharm. Sci.* 2016. V. 11. N 4. P. 183-194. DOI: 10.13140/RG.2.2.28908.26245.
7. **Ерзунов К.А., Одинова О.И., Трегунов А.В., Ильичева М.Д.** // *Изв. вузов. Технология текстил. пром-ти.* 2022. Т. 401. № 5. С. 5-18. DOI: 10.47367/0021-3497_2022_5_5.
8. **Дмитриева А.Д., Кузьменко В.А., Одинова Л.С., Одинова О.И.** // *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2015. Т. 58. Вып. 8. С. 67-70.
9. **Pal S., Tak Y.K., Song J.M.** // *Appl. Environ. Microbiol.* 2007. V. 73. N 6. P. 1712–1720. DOI: 10.1128/AEM.02218-06.
10. **Sharma G., Kumar A., Sharma S., Naushad Mu., Dwivedi P. R., ALOthman Zeid A., Mola G.T.** // *J. King Saud Univ. – Sci.* 2019. V. 31. N 2. P. 40. DOI: 10.1016/j.jksus.2017.06.012.
11. **Sirelkhatim A., Mahmud S., Seeni A., Mohamad N.H., Kaus A.** // *Nano-Micro Lett.* 2015. V. 3. N 7. P. 219-242. DOI: 10.1007/s40820-015-0040-x.
12. **Pasquet, J., Chevalier Y., Bouvier D., Couval E.** // *Int. J. Pharm.* 2014. V. 460. P. 92–100. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2013.10.031.
13. **Sudrajat H.** // *J. Cleaner Production.* 2018. V. 172. P. 1722-1729. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.12.02.
14. **Anja V., Marija G., Barbara S.** // *Coatings.* 2019. V. 550. N 9. 26 p. DOI: 10.3390/coatings9090550.
15. **Montazer M., Maali Amiri M.** // *J. Phys. Chem. B.* 2014. V. 118. N 6. P. 1453–1470. DOI: 10.1021/jp408532r.
16. **Lupan O., Chai G., Chow L.** // *Microelectron. Eng.* 2008. V. 85. P. 2220–2225. DOI: 10.1016/j.mee.2008.06.021.
17. **Николаева Н.С.** // *Журн. Сибир. Фед. ун-та. Сер.: Химия.* 2010. Т. 3. № 2. С. 153-173.
18. **Karthik S., Siva P., Balu K.S., Suriyaprabha R., Rajendran V., Maaza M.** // *Adv. Powder Technol.* 2017. N 28. P. 3184–3194. DOI: 10.1016/j.appt.2017.09.033.
19. **Khan M.F., Hameedullah M., Ansari A.H., Ahmad E.** // *Int. J. Nanomed.* 2014. N 9. P. 853–864. DOI: 10.2147/IJN.S47351.
20. **Khorsand Zak A., Abd H.M.W.H., Mahmoudian M.R., Darroudi M., Yousefi R.** // *Adv. Powder Technol.* 2013. V. 24. P. 618–624. DOI: 10.1016/j.appt.2012.11.008.
21. **Darroudi M., Sabouri Z., Kazemi Oskuee R., Khorsand Zak A., Kargar H., Abd Hamid M.H.N.** // *Ceram. Int.* 2014. V. 40. P. 4827–4831. DOI: 10.1016/j.ceramint.2013.09.032.
22. **Смирнова К.В., Шутов Д.А., Иванов А.Н., Манукян А.С., Рыбкин В.В.** // *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2022. Т. 65. Вып. 7. С. 28-34. DOI: 10.6060/ivkkt.20226507.6629.
23. **Verbi A., Gorjanc M., Simonci B.** // *Coatings.* 2019. V. 9. N 9. 26 p. DOI: 10.3390/coatings9090550.
24. **Hasnidawani J.N., Azlina H.N., Norita H., Bonnia N.N., Ratim S., Ali E.S.** // *Proc. Chem.* 2016. V. 19. P. 211 – 216. DOI: 10.1016/j.proche.2016.03.095.
2. **Shahid-ul-Islam, Mohd S. Faqeer M.** // *Textiles Clothing Sustainability*. 2017. P. 97-115. DOI: 10.1007/978-981-10-2188-6_3.
3. **Montazer, M., Pakdel E., Behzadnia A.** // *J. Appl. Polym. Sci.* 2011. V. 121. N 6. P. 3407–3413. DOI: 10.1002/app.33858.
4. **Qi K., Wang X., Xin J.H.** // *Text. Res. J.* 2011. V. 81. P. 101. DOI: 10.1177/0040517510383618.
5. **Radetic M.** // *J. Photochem. Photobiol. C: Photochem. Rev.* 2013. V. 16. P. 62–76.
6. **Vidya P., Arulpandi I.** // *World J. Pharm. Sci.* 2016. V. 11. N 4. P. 183-194. DOI: 10.13140/RG.2.2.28908.26245.
7. **Erzunov K.A., Odintsova O.I., Tregubov A.V., Ilyicheva M.D.** // *Izv. Vuzov. Tekhnol. Tekstil. Prom-ti.* 2022. V. 401. N 5. P. 5-18 (in Russian). DOI: 10.47367/0021-3497_2022_5_5.
8. **Dmitrieva A.D., Kuzmenko V.A., Odintsova L.S., Odintsova O.I.** // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]* 2015. V. 58. N 8. P. 67-70.
9. **Pal S., Tak Y.K., Song J.M.** // *Appl. Environ. Microbiol.* 2007. V. 73. N 6. P. 1712–1720. DOI: 10.1128/AEM.02218-06.
10. **Sharma G., Kumar A., Sharma S., Naushad Mu., Dwivedi P. R., ALOthman Zeid A., Mola G.T.** // *J. King Saud Univ. – Sci.* 2019. V. 31. N 2. P. 40. DOI: 10.1016/j.jksus.2017.06.012.
11. **Sirelkhatim A., Mahmud S., Seeni A., Mohamad N.H., Kaus A.** // *Nano-Micro Lett.* 2015. V. 3. N 7. P. 219-242. DOI: 10.1007/s40820-015-0040-x.
12. **Pasquet, J., Chevalier Y., Bouvier D., Couval E.** // *Int. J. Pharm.* 2014. V. 460. P. 92–100. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2013.10.031.
13. **Sudrajat H.** // *J. Cleaner Production.* 2018. V. 172. P. 1722-1729. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.12.02.
14. **Anja V., Marija G., Barbara S.** // *Coatings.* 2019. V. 550. N 9. 26 p. DOI: 10.3390/coatings9090550.
15. **Montazer M., Maali Amiri M.** // *J. Phys. Chem. B.* 2014. V. 118. N 6. P. 1453–1470. DOI: 10.1021/jp408532r.
16. **Lupan O., Chai G., Chow L.** // *Microelectron. Eng.* 2008. V. 85. P. 2220–2225. DOI: 10.1016/j.mee.2008.06.021.
17. **Nikolaeva N.S.** // *Shurn. Sibir. Fed. Univ. Ser.: Khim.* 2010. V. 3. N 2. P. 153-173 (in Russian).
18. **Karthik S., Siva P., Balu K.S., Suriyaprabha R., Rajendran V., Maaza M.** // *Adv. Powder Technol.* 2017. N 28. P. 3184–3194. DOI: 10.1016/j.appt.2017.09.033.
19. **Khan M.F., Hameedullah M., Ansari A.H., Ahmad E.** // *Int. J. Nanomed.* 2014. N 9. P. 853–864. DOI: 10.2147/IJN.S47351.
20. **Khorsand Zak A., Abd H.M.W.H., Mahmoudian M.R., Darroudi M., Yousefi R.** // *Adv. Powder Technol.* 2013. V. 24. P. 618–624. DOI: 10.1016/j.appt.2012.11.008.
21. **Darroudi M., Sabouri Z., Kazemi Oskuee R., Khorsand Zak A., Kargar H., Abd Hamid M.H.N.** // *Ceram. Int.* 2014. V. 40. P. 4827–4831. DOI: 10.1016/j.ceramint.2013.09.032.
22. **Smirnova K.V., Shutov D.A., Ivanov A.N., Manukyan A.S., Rybkin V.V.** // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]* 2022. V. 65. N 7. P. 28-34 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20226507.6629.
23. **Verbi A., Gorjanc M., Simonci B.** // *Coatings.* 2019. V. 9. N 9. 26 p. DOI: 10.3390/coatings9090550.
24. **Hasnidawani J.N., Azlina H.N., Norita H., Bonnia N.N., Ratim S., Ali E.S.** // *Proc. Chem.* 2016. V. 19. P. 211 – 216. DOI: 10.1016/j.proche.2016.03.095.

Поступила в редакцию (Received) 01.03.2023

Принята к опубликованию (Accepted) 02.05.2023