

КАПСУЛИРОВАНИЕ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДА ЦИНКА ДЛЯ ПРИДАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ ТЕКСТИЛЬНЫМ МАТЕРИАЛАМ

А.В. Трегубов, А.Ф. Алехина, К.А. Ерзунов, О.И. Одинцова

Кафедра химической технологии текстильных материалов, Ивановский государственный химико-технологический университет, Шереметевский пр-т, 7, Иваново, Российская Федерация, 153000

E-mail: tregubovandrei@outlook.com, anast.aleshina2016@yandex.ru, erzunovk@mail.ru, odolga@yandex.ru

В настоящее время развиваются исследования по разработке современных отделочных препаратов для придания текстильным материалам функциональных свойств, в частности, повышенной антимикробной активности. Наблюдается активное использование новых противомикробных агентов на основе наноразмерных частиц, которые демонстрируют меньшую склонность к провоцированию резистентности патогенных микроорганизмов по сравнению с традиционными антибиотиками. Особое внимание уделяется применению металлических наночастиц оксида цинка, отличающихся антибактериальными и фотокаталитическими свойствами.

Предложена технология придания текстильным материалам функциональных свойств путем нанесения на поверхность микрокапсул, содержащих наночастицы оксида цинка. В рамках исследования разработана методика электростатической сборки микрокапсул с наночастицами оксида цинка в ядре и в составе оболочки с использованием биосовместимых полиэлектролитов. В качестве оболочкоформирующих веществ выбраны биополимеры: хитозан, гуаровая камедь и ксантановая камедь. Методом динамического рассеяния света изучен размер синтезированных микрокапсул, а также дзета-потенциал полученных дисперсий. Микрокапсулы характеризуются малыми размерами: 87,2 нм для оболочек на основе хитозана и гуаровой камеди и 131 нм для хитозана и ксантановой камеди. С течением времени наблюдается уменьшение размеров частиц, что указывает на длительность формирования полиэлектролитного комплекса. Микрокапсулы, содержащие в составе оболочки наночастицы оксида цинка, характеризуются более крупными размерами (207,6 нм) по сравнению с капсулами, в которых наноразмерные частицы ZnO входили в состав ядра. Полученные составы могут быть рекомендованы для создания защитных текстильных материалов бытового и медицинского назначения, обладающих комплексом функциональных свойств.

Ключевые слова: заключительная отделка, функциональные ткани, наночастицы ZnO, микрокапсулирование, полиэлектролиты

ENCAPSULATION OF ZINC OXIDE NANOPARTICLES TO IMPOSED FUNCTIONAL PROPERTIES TO TEXTILE MATERIALS

A.V. Tregubov, A.F. Alekhina, K.A. Erzunov, O.I. Odintsova

Department of Chemical Technology of Textile Materials, Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Sheremetevsky ave., 7, Ivanovo, 153000, Russian Federation

E-mail: tregubovandrei@outlook.com, anast.aleshina2016@yandex.ru, erzunovk@mail.ru, odolga@yandex.ru

Currently, research is underway to develop modern finishing agents to impart functional properties to textile materials, in particular, increased antimicrobial activity. There is an active use of new antimicrobial agents based on nanosized particles, which demonstrate a lower tendency to provoke resistance in pathogenic microorganisms compared to traditional antibiotics. Particular attention is paid to the use of metallic zinc oxide nanoparticles, which have antibacterial and photocatalytic properties. A technology is proposed for imparting functional properties to textile materials by applying microcapsules containing zinc oxide nanoparticles to the fibrous surface. As part

of the study, a technique was developed for electrostatic assembly of microcapsules with zinc oxide nanoparticles in the core and shell composition using biocompatible polyelectrolytes. Chitosan, guar gum and xanthan gum biopolymers were selected as shell-forming substances. The size of the synthesized microcapsules and the zeta potential of the dispersions were studied using the dynamic light scattering method. The microcapsules are characterized by small sizes: 87.2 nm for shells based on chitosan and guar gum and 131 nm for chitosan and xanthan gum. Over time, a decrease in the particle size is observed, which indicates the duration of the formation of the polyelectrolyte complex. Microcapsules containing zinc oxide nanoparticles in the shell are characterized by larger sizes (207.6 nm) compared to capsules in which nanosized ZnO particles were part of the core. The resulting compositions can be recommended for obtaining protective textile materials for household and medical purposes with a range of functional properties.

Keywords: final finishing, functional fabrics, ZnO nanoparticles, microencapsulation, polyelectrolytes

Для цитирования:

Трегубов А.В., Алехина А.Ф., Ерзунов К.А., Одинцова О.И. Капсулирование наночастиц оксида цинка для придания функциональных свойств текстильным материалам. *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва)*. 2025. Т. LXIX. № 4. С. 53–58. DOI: 10.6060/rcj.2025694.8.

For citation:

Tregubov A.V., Alekhina A.F., Erzunov K.A., Odintsova O.I. Encapsulation of zinc oxide nanoparticles to imposed functional properties to textile materials. *Ros. Khim. Zh.* 2025. V. 69. N 4. P. 53–58. DOI: 10.6060/rcj.2025694.8.

ВВЕДЕНИЕ

Для создания функциональных биозащитных материалов актуальным является использование антимикробных агентов на основе наноразмерных частиц, которые менее склонны, чем классические антибиотики провоцировать резистентность патогенных микроорганизмов [1, 2]. Это обусловлено широко направленным спектром действия наноматериалов, высоким соотношением площади активной поверхности частиц к объему и их уникальными химическими и физическими свойствами [3]. Большое внимание уделено изучению металлических наночастиц, содержащих такие элементы, как серебро [4, 5], медь [6], цинк [7, 8], титан [9], золото [10], и другие [11]. Перечисленные наночастицы металлов являются наиболее перспективными антимикробными агентами.

Для заключительной отделки текстильных материалов перспективным является использование наночастиц оксидов металлов: оксида цинка (ZnO) и диоксида титана (TiO₂), обладающих повышенной фотокаталитической активностью за счет своей полупроводниковой природы [12]. Природа наночастиц обеспечивает проявление стабильных антимикробных, фотокаталитических, УФ-защитных и других свойств. Оксид цинка широко применяется в медицинских и косметических средствах, входит в состав мазей и гелей, солнцезащитных

кремов [13]. Благодаря свойству биосовместимости он может быть использован и в защитных текстильных материалах бытового и медицинского назначения [14, 15].

Однако, несмотря на все преимущества наномодификаторов, в отделке текстиля они используются редко, а технологии отделки тканей на их основе, внедренные в производство, практически отсутствуют. Основной проблемой, тормозящей развитие таких технологий, является достижение прочной иммобилизации наночастиц на волокнистой поверхности, что требует применения различных закрепителей и связующих агентов [16]. Перспективным решением этой задачи является использование метода микрокапсулирования [17, 18], который основан на формировании полимерной оболочки вокруг активного компонента, например, наноразмерной частицы [19–21]. Сформированная оболочка позволяет закрепить микрокапсулу на текстильном материале, защищает активную частицу от внешнего воздействия, а также обеспечивает пролонгированное проявление функционального эффекта наномодификатора. Среди существующих методов микрокапсулирования наиболее простым и эффективным считается электростатическая сборка с использованием полиэлектролитов – полимеров, способных создавать стабильную оболочку вокруг частиц оксида цинка благодаря электростатическим взаимодействиям и образова-

нием стабильного полиэлектролитного комплекса [21, 22]. Исследование направлено на получение стабильных дисперсий с микрокапсулами, содержащими наночастицы оксида цинка, с использованием для капсуляции экологически безопасных реагентов [23].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Материалы и реактивы. Хитозан пищевой (100%, ООО БИОПРОГРЕСС); ксантановая камедь, гуаровая камедь (100%, Xinjiang Meihua Amino Acid C.O., LTD); эфирное масло жожоба (ООО «Натуральные масла»); эмульгатор Неонол АФ 9/10 (100%, НИЖНЕКАМСКНЕФТЕХИМ); карбоксипав АФ 6.90 (карбоксилаты оксиэтилированных алкилфенолов, 90%, ООО НПО «НИИПАВ», г. Волгодонск); наночастицы оксида цинка (ZnO, порошок, ОСОБО ЧИСТЫЕ ВЕЩЕСТВА, г. Москва).

Синтез микрокапсул с наночастицами ZnO. Микрокапсулы получали методом электростатической самосборки с формированием различной архитектуры оболочки капсулы. На первом этапе осуществляли эмульгирование эфирного масла в присутствии поверхностно-активных веществ (Неонол АФ 9/10) и ПАВ (карбоксипав АФ 6.90). Затем последовательно вводили в систему полиэлектролиты. При введении каждого последующего компонента проводили перемешивание при 600 об/мин.

Получен ряд дисперсий, в которых наночастицы были помещены, как в ядро микрокапсулы, так и в структуру оболочки. В первом случае наноразмерный оксид цинка смешивали непосредственно

с используемым эфирным маслом Жожоба. Во втором – с одним из полиэлектролитов. В качестве оболочкоформирующих веществ опробованы различные биополимеры – полиэлектролиты: ксантановая камедь, гуаровая камедь и хитозан.

Методы исследования. Изучение морфологии поверхности синтезированных частиц осуществляли на электронном микроскопе МИКМЕД-6. Размеры полученных микрокапсул определяли методом динамического рассеяния на приборе Photocor Compact-Z.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Получен ряд дисперсий, содержащих микрокапсулы с оболочками на основе пары противоположно заряженных полиэлектролитов хитозан / гуаровая камедь, хитозан / ксантановая камедь. Характеристика полученных микрокапсул приведена в табл. 1.

На полученных изображениях наблюдаются сформировавшиеся микрокапсулы с частицами оксида цинка в составе ядра. Синтезированные микрокапсулы характеризуются малыми размерами (до 200 нм). Наименьший размер микрокапсул наблюдается для дисперсий, в которых оболочки синтезированы на основе хитозана и гуаровой камеди. Вместе с этим низкий дзета-потенциал систем предполагает их неустойчивость, однако с течением времени не происходит выпадения осадка и размеры частиц существенно не изменяются (табл. 2).

Таблица 1

Изображения и характеристика синтезированных микрокапсул, архитектура оболочки которых включает биосовместимые полиэлектролиты

Table 1. Characteristics of synthesized microcapsules, the shell architecture of which includes biocompatible polyelectrolytes

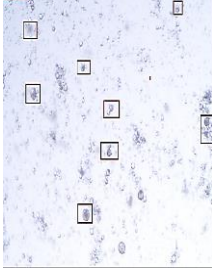
Полиэлектролиты	ζ -потенциал, мВ	Изображение микрокапсул	Размер частиц, нм
Хитозан Гуаровая камедь	$2,2 \pm 0,12$		87,2
Хитозан Ксантановая камедь	$0,21 \pm 1,28$		131

Таблица 2

Размерные характеристики и устойчивость полученных микрокапсул с включением в ядро масла Жожоба и ZnO

Table 2. Changes in the dimensional characteristics and stability of the obtained microcapsules with the inclusion of Jojoba oil and ZnO in the core

Время изучения дисперсии, сутки	Размер частиц, нм	ζ-потенциал, мВ
Хитозан / Гуаровая камедь		
1	87,21	-2,2±0,12
2	196,3	-5,68±0,8
6	124,2	-2,84±0,4
7	99,09	-7,24±0,27
8	115,59	-10,82±0,69
Хитозан / Ксантановая камедь		
1	131	0,207±1,28
2	124,13	-2,2±0,104
6	98,17	-1,52±4,3
8	87,89	-4,89±0,138

Через 8 сут. с момента приготовления дисперсии микрокапсул с оболочками на основе пары хитозан / ксантановая камедь происходит уменьшение размеров частиц со 131 нм до 87,89 нм. Подобное уплотнение микрокапсул может быть связано с длительным процессом формирования полиэлектролитного комплекса (ПЭК), поскольку исследуемые системы являются сложными многокомпонентными составами, содержащими поверхностно-активные вещества и пару гибкоцепных полиэлектролитов, участвующих в процессе постоянного взаимодействия с образованием супрамолекулярных структур. В данном случае на первом этапе происходит образование комплекса между неионогенным ПАВ и полиэлектролитом за счет водородных связей и гидрофобного взаимодействия, что приводит к образованию полимер-коллоидного комплекса и сворачиванию системы. Последующее образование капсулы замедляется в процессе взаимного электростатического притяжения полиионов макромолекул, разноименно заряженных полиэлектролитов, вследствие чего происходит переориен-

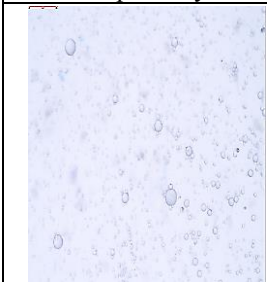
тация полимерных цепочек и надстраивание полиэлектролитного комплекса. Более разветвленная структура молекулы ксантановой камеди с наличием карбоксильных групп приводит к формированию более плотной упаковки микроконтейнера.

В случае применения гуаровой камеди в качестве оболочкоформирующего вещества процесс комплексообразования, по нашему мнению, сопровождается промежуточным этапом разворачивания полимерной цепочки молекулы полиэлектролита при формировании полимерколлоидного комплекса, что увеличивает линейные размеры выстраиваемых супрамолекулярных структур. Дальнейшее взаимодействие полиэлектролитов приводит к сворачиванию системы и формированию нерастворимого ПЭК.

Синтезированы микрокапсулы с оболочками, сформированными при взаимодействии хитозана и гуаровой камеди, в которую при перемешивании вносили наночастицы ZnO (табл. 3). Введение наноразмерных частиц в состав архитектуры оболочки капсулы повышает эффективность материала при краткосрочном действии на кожные покровы за счет облегчения возможности выхода частицы из микрокапсулы по сравнению с капсулами, содержащими частицы оксида цинка в ядре.

Таблица 3

Изображение и размерные характеристики микрокапсул, архитектура оболочки которых включает наночастицы ZnO, хитозан и гуаровую камедь
Table 3. Image and dimensional characteristics of microcapsules, the shell architecture of which includes ZnO nanoparticles, chitosan and guar gum

Изображение микрокапсул	Размер частиц, нм	ζ-потенциал, мВ
	207,6	11,89±0,36

Полученные капсулы обладают большими размерами (табл. 3), что обуславливается менее плотной организацией структуры оболочки, по сравнению с микрокапсулами, содержащими наночастицы непосредственно в ядре. С течением времени (8-10 сут.) происходит перераспределение частиц между полиэлектролитными слоями и уплотнение микроконтейнера, что приводит к значительному уменьшению размеров микрокапсулы до 109,2 нм, при этом ζ-потенциал системы возрастает до 16,5 мВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен протокол синтеза цинксо-держащих микрокапсул различной структуры: с включением наночастиц оксида цинка в состав ядра капсулы и в архитектуру оболочки. Оболочки микрокапсул сформированы на основе пар биосовместимых полиэлектролитов хитозан / гуаровая камедь, хитозан / ксантановая камедь. Изучены размеры сформированных микрокапсул и агрегативная устойчивость систем на их основе. Размеры микрокапсул, оболочки которых сформированы парой хитозан / гуаровая камедь составили 87,2 нм, хитозан / ксантановая камедь – 131 нм для свежеприготовленных дисперсий. Показано, что с течением времени наблюдается заметное снижение размеров частиц не зависимо от состава оболочки капсулы,

что свидетельствует о длительности протекания процесса образования полиэлектролитного комплекса и формирования более плотной упаковки микроконтейнера.

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

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (номер проекта FZZW2023-0008).

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

The work was carried out within the framework of the State Assignment for Research, topic No. FZZW-2023-008.

ЛИТЕРАТУРА

REFERENCES

1. Terreni M., Taccani M., Pregnotato M. // *Molecules*. 2021. V. 26. N 9. P. 2671. DOI: 10.3390/molecules26092671.
2. Asare E.O., Mun E.A., Marsili E., Paunov V.N. // *Journal of Materials Chemistry B*. 2022. V. 10. P. 5129-5153. DOI: 10.1039/D2TB00233G.
3. Harish K.K., Nagasamy V., Himangshu B., Anuttam K. // *Biomed. J. Sci. Tech. Res.* 2018. N 4(2). P. 3765-3775. DOI: 10.26717/BJSTR.2018.04.001011.
4. Wu Y., Yang Y., Zhang Z., Wang Z., Zhao Y., Sun L. // *Textile Research Journal*. 2019. V. 89. N 5. P. 867-880. DOI: 10.1177/0040517518758002.
5. Zhu J., Li H., Wang, Y., Wang Y., Yan J. // *Polymers*. 2021. V. 13. N 8. P. 1338. DOI: 10.3390/polym13081338.
6. Reshma, Shaik H., Venkatesan K., Kadeer M.D., Somaiah P.V. // *Russ. J. Gen. Chem.* 2024. V. 94. N 1. P. 220-233. DOI: 10.1134/S1070363224010225.
7. Qi K., Cheng B., Yu J., Ho W. // *J. Alloy. Comp.* 2017. V. 727. P. 792-820. DOI: 10.1016/j.jallcom.2017.08.142.
8. Karthik S., Siva P., Balu K.S., Suriyaprabha R., Rajendran V., Maaza M. // *Advanced Powder Technology*. 2017. V. 28. N 12. P. 3184-3194. DOI: 10.1016/J.appt.2017.09.033.
9. Mahmoud M., Sherif N., Fathallah A.I., Maamoun D., Abdelrahman M.S., Hassabo A.G., Khattab T.A. // *Journal of Textiles, Coloration and Polymer Science*. 2023. V. 20. N 2. P. 197-202. DOI: 10.21608/jtcps.2023.188833.1165.
10. Mehravani B., Ribeiro A.I., Zille A. // *Nanomaterials*. 2021. V. 11. N 5. P. 1067. DOI: 10.3390/nano11051067.
11. Bhandari V., Jose S., Badanayak P., Sankaran A., Anandan, V. // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2022. N 61(1). P. 86-101. DOI: 10.1021/acs.iecr.1c04203.
12. Khan M.Z., Baheti V., Ashraf M., Hussain T., Ali A., Javid A., Rehman A. // *Fibers and Polymers*. 2018. V. 19. N 8. P. 1647-1654. DOI: 10.1007/s12221-018-7935-3.
13. Jiang Y., Jiang Y., Song Y., Miao M., Cao S., Feng X., Fangc J., Shia L. // *Journal of Materials Chemistry C*. 2015. V. 26. N 3. P. 6717-6724. DOI: 10.1039/C5TC00812C.
14. Прокопчук Н.Р., Ленартович Л.А., Вишневская Т.А., Хотько А.Н. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2025. Т. 68. Вып. 3. С. 104-112. DOI: 10.6060/ivkkt.20256803.7122.
15. Verbič A., Primc G., Šala M., Gorjanc M. // *Coatings*. 2019. V. 9. N 550. P. 1-26. DOI: 10.3390/coatings9090550.
1. Terreni M., Taccani M., Pregnotato M. // *Molecules*. 2021. V. 26. N 9. P. 2671. DOI: 10.3390/molecules26092671.
2. Asare E.O., Mun E.A., Marsili E., Paunov V.N. // *Journal of Materials Chemistry B*. 2022. V. 10. P. 5129-5153. DOI: 10.1039/D2TB00233G.
3. Harish K.K., Nagasamy V., Himangshu B., Anuttam K. // *Biomed. J. Sci. Tech. Res.* 2018. N 4(2). P. 3765-3775. DOI: 10.26717/BJSTR.2018.04.001011.
4. Wu Y., Yang Y., Zhang Z., Wang Z., Zhao Y., Sun L. // *Textile Research Journal*. 2019. V. 89. N 5. P. 867-880. DOI: 10.1177/0040517518758002.
5. Zhu J., Li H., Wang, Y., Wang Y., Yan J. // *Polymers*. 2021. V. 13. N 8. P. 1338. DOI: 10.3390/polym13081338.
6. Reshma, Shaik H., Venkatesan K., Kadeer M.D., Somaiah P.V. // *Russ. J. Gen. Chem.* 2024. V. 94. N 1. P. 220-233. DOI: 10.1134/S1070363224010225.
7. Qi K., Cheng B., Yu J., Ho W. // *J. Alloy. Comp.* 2017. V. 727. P. 792-820. DOI: 10.1016/j.jallcom.2017.08.142.
8. Karthik S., Siva P., Balu K.S., Suriyaprabha R., Rajendran V., Maaza M. // *Advanced Powder Technology*. 2017. V. 28. N 12. P. 3184-3194. DOI: 10.1016/J.appt.2017.09.033.
9. Mahmoud M., Sherif N., Fathallah A.I., Maamoun D., Abdelrahman M.S., Hassabo A.G., Khattab T.A. // *Journal of Textiles, Coloration and Polymer Science*. 2023. V. 20. N 2. P. 197-202. DOI: 10.21608/jtcps.2023.188833.1165.
10. Mehravani B., Ribeiro A.I., Zille A. // *Nanomaterials*. 2021. V. 11. N 5. P. 1067. DOI: 10.3390/nano11051067.
11. Bhandari V., Jose S., Badanayak P., Sankaran A., Anandan, V. // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2022. N 61(1). P. 86-101. DOI: 10.1021/acs.iecr.1c04203.
12. Khan M.Z., Baheti V., Ashraf M., Hussain T., Ali A., Javid A., Rehman A. // *Fibers and Polymers*. 2018. V. 19. N 8. P. 1647-1654. DOI: 10.1007/s12221-018-7935-3.
13. Jiang Y., Jiang Y., Song Y., Miao M., Cao S., Feng X., Fangc J., Shia L. // *Journal of Materials Chemistry C*. 2015. V. 26. N 3. P. 6717-6724. DOI: 10.1039/C5TC00812C.
14. Prokopchuk N.R., Lenartovich L.A., Vishnevskaya T.A., Khot'ko A.N. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2025. V. 68. N 3. P. 104-112. DOI: 10.6060/ivkkt.20256803.7122.

16. Mulchandani N., Karnad V. // *Research Journal of Textile and Apparel*. 2022. N 26(4). P. 310-322. DOI: 10.1108/RJTA-02-2021-0018.
17. Bakry A.M., Abbas S., Ali B., Majeed H., Abouelwafa M.Y., Mousa A., Liang L. // *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* 2016. V. 15. P. 143-182. DOI: 10.1111/1541-4337.12179.
18. Boh Podgornik B., Šandrić S., Kert M. // *A Systematic Review*. 2021. V.11. N 11. P. 1371. DOI:10.3390/coatings11111371.
19. Дымникова Н.С., Ерохина Е.В., Кузнецов О.Ю. // *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва)*. 2024. Т. LXVIII. № 2. С. 3-12. DOI: 10.6060/RCJ.2024682.1.
20. Ерзунов К.А., Одинцова О.И., Трегубов А.В., Ильичева М.Д., Липина А.А. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2023. Т. 66. Вып. 9. С. 89-95. DOI: 10.6060/ivkkt.20236609.6825.
21. Одинцова О.И., Владимирцева Е.Л., Козлова О.В., Смирнова С.В., Липина А.А., Петрова Л.С., Ерзунов К.А., Константинова З.А., Зимнуров А.Р., Быков Ф.А., Мельников А.Г. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2023. Т. 66. Вып. 7. С. 173-184. DOI: 10.6060/ivkkt.20236607.6844j.
22. Липина А.А., Петрова Л.С., Одинцова О.И., Козлова О.В., Владимирцева Е.Л., Смирнова С.В., Ильичева М.Д. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2022. Т. 65. Вып. 6. С. 97-104. DOI:10.6060/ivkkt.20226506.6628.
23. Власкина Е.С., Соотц Ю.Н., Липина А.А., Яминзода З.А., Одинцова О.И. // *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва)*. 2024. Т. LXVIII. № 4. С. 110-122. DOI: 10.6060/rcj.2024684.14.
15. Verbič A., Primc G., Šala M., Gorjanc M. // *Coatings*. 2019. V. 9. N 550. P. 1-26. DOI: 10.3390/coatings9090550.
16. Mulchandani N., Karnad V. // *Research Journal of Textile and Apparel*. 2022. N 26(4). P. 310-322. DOI: 10.1108/RJTA-02-2021-0018.
17. Bakry A.M., Abbas S., Ali B., Majeed H., Abouelwafa M.Y., Mousa A., Liang L. // *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* 2016. V. 15. P. 143-182. DOI: 10.1111/1541-4337.12179.
18. Boh Podgornik B., Šandrić S., Kert M. // *A Systematic Review*. 2021. V.11. N 11. P. 1371. DOI:10.3390/coatings11111371.
19. Dymnikova N.S., Erohina E.V., Kusnetsov O.Yu. // *Ros. Khim. Zh.* 2024. V. 68. N 2. P. 3-12. DOI: 10.6060/rcj.2024682.1.
20. Erzunov K.A., Odintsova O.I., Tregubov A.V., Ilyicheva M.D., Lipina A.A. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N9. P. 89-95. DOI: 10.6060/ivkkt.20236609.6825.
21. Odintsova O.I., Vladimirtseva E.L., Kozlova O.V., Smirnova S.V., Lipina A.A., Petrova L.S., Erzunov K.A., Konstantinova Z.A., Zimnurov A.R., Bykov F.A., Melnikov A.G. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 7. P. 173-184. DOI: 10.6060/ivkkt.20236607.6844j.
22. Lipina A.A., Petrova L.S., Odintsova O.I., Kozlova O.V., Vladimirtseva E.L., Smirnova S.V., Ilyicheva M.D. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2022. V. 65. N 6. P. 97-104. DOI: 10.6060/ivkkt.20226506.6628.
23. Vlaskina E.S., Soots Yu.N., Lipina A.A., Yaminzoda Z.A., Odintsova O.I. // *Ros. Khim. Zh.* 2024. V. 68. N 4. P. 110-122. DOI: 10.6060/rcj.2024684.14.

Поступила в редакцию 09.07.2025
Принята к опубликованию 07.10.2025

Received 09.07.2025
Accepted 07.10.2025