

ПРИМЕНЕНИЕ НЕОРГАНИЧЕСКИХ НАНОЧАСТИЦ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.В. Трегубов¹, К.А. Ерзунов¹, Е.Б. Санжеева², О.И. Одинцова¹

¹Кафедра Химической технологии волокнистых материалов, Ивановский государственный химико-технологический университет, Шереметевский пр., 7, Иваново, Российская Федерация, 153000

²АО «ПРОМЫШЛЕННЫЕ АКТИВЫ», Ленинградская ул, 14/1, Всеволожск, Ленинградская область, Российская Федерация, 188640

E-mail: Tregubovandrei@outlook.com, erzunovk@mail.ru, elenasanzheeva1689@mail.ru, odolga@yandex.ru

Современная текстильная промышленность все активнее обращается к возможностям нанотехнологий, которые открывают широкие перспективы для создания многофункциональных материалов с улучшенными свойствами. Сегодня потребители уже не ограничиваются эстетическими характеристиками одежды – их все чаще интересуют функциональные и защитные свойства тканей. Одним из наиболее перспективных направлений реализации нанотехнологий в текстильной промышленности стало применение металлических наночастиц (МНЧ) в специальной отделке текстиля. Их применение может улучшить свойства и повысить ценность текстильных изделий при меньших затратах. Включение МНЧ в текстиль позволяет добиться проявления многофункциональных свойств материала, таких как защита от ультрафиолета, формоустойчивость, самоочищение и электропроводность, а также антимикробные, антистатические, и огнеупорные свойства, без ущерба для присущих текстилю характеристик. Благодаря этому использование нанотехнологий в текстильной индустрии стремительно развивается, становясь важным элементом технологического прогресса и удовлетворения растущего спроса. В обзоре рассматриваются основные исследовательские попытки применения металлических наночастиц для модификации текстиля для придания им различных функциональных свойств. К основным МНЧ, которые используют в текстильной промышленности, относят серебро, а также оксиды цинка и меди, диоксиды титана и кремния. Оксид цинка и диоксид титана применяются для создания самоочищающихся поверхностей, защиты изделия от ультрафиолетового излучения и действия различных патогенных микроорганизмов благодаря своей фотокаталитической активности и биосовместимости. Оксид меди находит применение в антимикробных покрытиях и в качестве проводящего материала для электронных компонентов, а диоксид кремния и оксид магния используются для создания гидрофобных и огнеупорных материалов. Комбинация оксидов металлов, позволяет дополнительно усиливать функциональные свойства текстиля, расширяя диапазон его применения в различных сферах человеческой деятельности.

Ключевые слова: наночастицы, нанотехнологии, функциональные текстильные материалы, УФ защита, самоочищение, фотокатализ, супергидрофобность

APPLICATION OF INORGANIC NANOPARTICLES FOR THE CREATION OF FUNCTIONAL TEXTILE MATERIALS

A.V. Tregubov¹, K.A. Erzunov¹, E.B. Sanzheeva², O.I. Odintsova¹

¹Department of Chemical Technology of Fibrous Materials, Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Sheremetevsky ave., 7, Ivanovo, 153000, Russian Federation

²JSC «PROMYSHLENNYYE AKTIVY», Leningradskaya st., 14/1, Vsevolozhsk, Leningrad region, 188640, Russian Federation

E-mail: Tregubovandrei@outlook.com, erzunovk@mail.ru, elenasanzheeva1689@mail.ru, odolga@yandex.ru

The modern textile industry is increasingly turning to the possibilities of nanotechnology, which open up broad prospects for the creation of multifunctional materials with improved properties. Today, consumers are no longer limited to the aesthetic characteristics of clothing – they are increasingly interested in the functional and protective properties of fabrics. One of the most promising areas of nanotechnology implementation in the textile industry has become the use of metal nanoparticles (MNPs) in special textile finishing. Their use can improve the properties and increase the value of textiles at a lower cost. The inclusion of MNPs in textiles allows us to achieve the manifestation of multifunctional properties of the material, such as UV protection, dimensional stability, self-cleaning and electrical conductivity, as well as antimicrobial, antistatic, and fire-resistant properties, without compromising the inherent characteristics of textiles. Due to this, the use of nanotechnology in the textile industry is rapidly developing, becoming an important element of technological progress and meeting growing demand. The review considers the main research attempts to use metal nanoparticles to modify textiles to impart various functional properties. The main MNPs used in the textile industry include silver, as well as zinc and copper oxides, titanium dioxide and silicon dioxide. Zinc oxide and titanium dioxide are used to create self-cleaning surfaces, protect products from ultraviolet radiation and the action of various pathogenic microorganisms due to their photocatalytic activity and biocompatibility. Copper oxide is used in antimicrobial coatings and as a conductive material for electronic components, and silicon dioxide and magnesium oxide are used to create hydrophobic and fireproof materials. The combination of metal oxides allows for additional enhancement of the functional properties of textiles, expanding the range of its application in various areas of human activity.

Keywords: nanoparticles, nanotechnology, functional textile materials, UV protection, self-cleaning, photocatalysis, superhydrophobicity

Для цитирования:

Трегубов А.В., Ерзунов К.А., Санжеева Е.Б., Одинцова О.И. Применение неорганических наночастиц для создания функциональных текстильных материалов. *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва)*. 2025. Т. LXIX. № 4. С. 13–22. DOI: 10.6060/rcj.2025694.2.

For citation:

Tregubov A.V., Erzunov K.A., Sanzheeva E.B., Odintsova O.I. Application of inorganic nanoparticles for the creation of functional textile materials. *Ros. Khim. Zh.* 2025. V. 69. N 4. P. 13–22. DOI: 10.6060/rcj.2025694.2.

ВВЕДЕНИЕ

Многофункциональные ткани, модифицированные индивидуальными наночастицами и нанокompозитами, представляют собой крайне перспективное направление в области текстильной промышленности. В последние годы, благодаря применению нанотехнологий, были достигнуты значительные успехи в модификации тканей специального назначения, используемых в различных областях деятельности человека. Текстиль традиционно применяется для защиты тела от различных неблагоприятных факторов, включая перегрев, ультрафиолетовое излучение, неприятные запахи и вредоносные микроорганизмы.

Наночастицы (НЧ) используют для придания текстильным изделиям функциональных свойств,

так как они, обладая развитой поверхностью и высокой поверхностной энергией, позволяют при малой рабочей концентрации получать значительный эффект. Большинство наночастиц металлов крайне нестабильны и имеют тенденцию образовывать агрегаты, поэтому важно сохранять хорошую устойчивость наночастиц в дисперсионной среде. Наночастицы обеспечивают более глубокое проникновение и лучшую адгезию в матрице ткани. Использование благородных металлов, таких как платина, золото и серебро, преобладает над другими металлическими наноматериалами из-за их широкого спектра антимикробного действия [1]. Оксиды металлов, такие как TiO_2 , ZnO , CuO , MgO наиболее часто используются из-за их термической стабильности, не токсичности, биосовместимости и экономичности (табл. 1).

Таблица 1

Многофункциональные свойства наночастиц металлов на текстиле
 Table 1. Multifunctional properties of metal nanoparticles on textiles

НЧ	Ткань	Функциональные свойства	
Ag	ХБ	Антибактериальность	[2]
TiO ₂	ХБ	Антибактериальность Огнестойкость Самоочищение	[3]
Mg(OH) ₂	Шелк	Огнестойкость	[4]
ZnO	ХБ Шерсть ХБ/ПЭТФ	Антибактериальность Гидрофобность УФ защита	[5-7]
Al ₂ O ₃	Хлопок	Огнестойкость УФ защита	[8]
SiO ₂	Хлопок Шелк	Антибактериальность Гидрофобность Огнестойкость	[9]
CeO ₂	ПЭТФ Шелк	Антибактериальность УФ защита	[10, 11]
Fe ₂ O ₃	ХБ	Антибактериальность Фотокаталитичность	[12, 13]
CuO	ХБ ПЭТФ	Антибактериальность Фотокаталитичность	[14, 15]

АНТИБАКТЕРИАЛЬНЫЙ ТЕКСТИЛЬ

Текстиль является средой для роста различных патогенов, когда люди контактируют с характерной средой их распространения, такими как клиники, медицинские центры или инфицированные люди. По мере того, как воздействие микроорганизмов переходит от эпидемии к пандемии, осведомленность о средствах индивидуальной защиты растет во всем мире, и, следовательно, спрос на них резко возрастает.

Традиционно в качестве противомикробных средств для различных применений используется множество натуральных и синтетических составов [16]. Хотя нанокмпозиты используются в текстильной промышленности, они не должны быть токсичными для человека, поскольку некоторые химические вещества могут вызвать раздражение кожи [17]. Выбранный противомикробный состав должен иметь достаточное сродство к текстильному волокну, чтобы он мог фиксироваться на ткани в течение необходимого времени [18]. Это важно для его фиксации и снижения вымывания при стирке.

Антибактериальная модификация текстиля предотвращает рост на нем бактерий, грибов и других микроорганизмов. В этом процессе используются один или несколько химических агентов, способных разрушить структуру микроорганизма. Антибактериальные материалы делятся на две ос-

новные группы: бактериостатические и бактерицидные. Бактериостатик может связываться с аминокислотами ДНК в бактериальных структурах и предотвращать размножение бактерий. Бактерициды могут нарушить обычный метаболизм бактерий и полностью их уничтожить [19, 20].

По строению клеточной стенки бактерии делятся на грамположительные и грамотрицательные бактерии. Грамположительные бактерии имеют относительно толстую стенку, состоящую из большого числа слоев пептидогликана и только одной плазматической мембраны. С другой стороны, грамотрицательные бактерии, хотя и обладают более тонким слоем пептидогликанов, чем грамположительные, но их клеточная стенка имеет более сложное строение с двумя мембранами. Поэтому грамотрицательные бактерии более устойчивы ко многим химическим агентам, чем грамположительные бактерии [19].

Целлюлозные, шерстяные, вискозные текстильные материалы, обрабатываемые НЧ неорганических веществ, такими как металлы и их оксиды (оксид меди и оксид цинка, диоксид титана, оксид магния, серебро и золото) проявляют высокую антибактериальную активность по отношению к грамотрицательным бактериям *E. coli* [20, 21].

Среди различных наночастиц серебро является наиболее используемым для антимикробных свойств текстиля. Наночастицы Ag активно взаи-

модействуют с видимым светом из-за их высокой интегральной проводимости электронов [22]. Антимикробная активность наночастиц Ag объясняется устойчивой доставкой Ag^+ и соединения Ag из наноразмерных кластеров атомов металлического серебра. Диссоциация солей Ag (т.е. $AgNO_3$, $AgCl$) возникает при растворении в воде, в результате чего выделяется Ag^+ ион [23]. Токсичность ионов серебра ограничена бактериями и другими микробами, поэтому их используют в повязках на раны и упаковочных материалах для пищевых продуктов. Нитрат серебра является наиболее распространенным прекурсором синтеза для получения наночастиц серебра [24]. Покрытие наночастиц Ag на хлопчатобумажных и полиэфирных тканях эффективно против широкого спектра бактерий и грибов [24-27].

Таблица 2

Использование наночастиц серебра для антибактериальной отделки текстиля
Table 2. Use of silver nanoparticles for antibacterial textile finishing

НЧ	Изученные культуры бактерий	Текстильные материалы	Источники
Ag	<i>S. Aureus</i> , <i>E. Coli</i>	Шерсть	[28]
	<i>S. Aureus</i> , <i>E. Coli</i>	Лен	[29]
	<i>S. Aureus</i>	Нейлон	[30]
	<i>S. Aureus</i>	Шелк	[31]
	<i>E. Coli</i>	Вискоза	[32]
	<i>F. Oxysporum</i> , <i>A. Brassicicola</i>	Хлопок	[33]

Ученые предполагают следующие три основных механизма антибактериального действия наночастиц серебра:

Разложение бактериальной клеточной стенки;

Вступая в реакцию с группой S–H в ферментах и ингибируя метаболизм микроорганизма;

Создание активных кислородных групп.

Наметилась тенденция использования наночастиц в бикомпонентных составах композитов с различными оксидами металлов с целью придания полифункциональной отделки текстильным материалам или усиления антибактериального эффекта. Биметаллические НЧ получают путем смешивания или легирования двух различных металлических элементов с получением различных морфологий и архитектур, в основном синтезированных путем химического восстановления [34, 35]. Так в последние годы тщательно исследовался сплав Ag-

Cu [36-38], который характеризуется более высокой антибактериальной эффективностью, чем НЧ Ag или Cu, используемые отдельно или в смеси [39-41]. Несмотря на то, что исследования показали, что антибактериальные свойства Ag-Cu НЧ заметно лучше, чем у индивидуальных металлов, механизм усиления антибактериальной эффективности до сих пор остается не выясненным.

Диоксид титана (TiO_2) является одним из наиболее важных и широко изученных фотокатализаторов благодаря своей уникальной фотокаталитической активности, химической стабильности, низкой токсичности и умеренной стоимости.

Наночастицы диоксида титана, допированного серебром, были получены путем добавления по каплям тетраизопророксида титана (TIP) к микроэмульсии, содержащей ионы серебра. Результаты показали высокую фотоактивность Ag- TiO_2 по сравнению с наночастицами TiO_2 , и Ag по отдельности [42].

Когда диоксид титана облучается светом с энергией большей или равной энергии его запрещенной зоны, генерируются электронно-дырочные пары, которые могут вызывать окислительно-восстановительные реакции на поверхности TiO_2 [43]. Общая схема фотокаталитического повреждения клеток микроорганизмов TiO_2 включает несколько этапов:

Фотовозбужденный катализатор TiO_2 создает электронно-дырочные пары, которые мигрируют к поверхности TiO_2 .

Фотогенерированные дырки в TiO_2 способны взаимодействовать с адсорбированными гидроксильными группами ($-OH$) или ионами гидроксида (OH^-) на границе раздела катализатор/вода, что приводит к образованию высоко реактивных гидроксильных радикалов. В то же время электроны могут взаимодействовать с молекулами кислорода, приводя к образованию супероксид-ионов.

Наконец, образующиеся высокоактивные формы кислорода могут окислять органические соединения/клетки, адсорбированные на поверхности TiO_2 , что приводит к гибели микроорганизмов [43].

При соединении электрона и электронной дырки с кислородом в результате окислительно-восстановительной реакции образуются углекислый газ и вода.

Особый интерес приобрели функциональные покрытия на текстильных материалах.

Разработано множество видов синтеза наноструктурированного TiO_2 , включая гидротермальный золь-гель, химическое осаждение из паровой фазы, физическое осаждение из паровой фазы,

сольвотермический метод, электрохимические подходы, микроэмульсии «вода в масле» и «масло в воде» и зеленый синтез [44–46].

Кристаллическая фаза, размер частиц и форма зависят от способа синтеза и условий эксперимента, таких как тип прекурсора TiO_2 , использование поверхностно-активных веществ, растворитель, температура и время реакции. Среди этих способов золь-гель и гидротермальный метод являются наиболее успешными из-за возможности контролировать морфологию, размер частиц и кристалличность получаемых наноматериалов [46].

Наночастицы TiO_2 используются в текстиле для придания ему антибактериальных свойств. Введение TiO_2 , или его нанокомпозита $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ в хлопчатобумажные ткани придают ей полифункциональные свойства: антибактериальность, масло-, водоотталкивание, самоочищение [47].

Еще одним материалом с высокой каталитической активностью является оксид цинка. Механизм его действия аналогичен приведенному для TiO_2 . Когда энергия фотона превышает энергию запрещенной зоны ZnO , электроны из валентной зоны переходят в зону проводимости, генерируя высокоактивные фотогенерированные дырки (h^+) и фотогенерированные электроны (e^-). Образующиеся активные радикалы взаимодействуют с поверхностью клеточной стенки бактерии с дальнейшим ее разрушением.

Наночастицы ZnO могут медленно высвобождать Zn^{2+} в водной среде. Поверхность клеточной стенки бактерий заряжена отрицательно, поэтому Zn^{2+} адсорбируется на поверхности бактерий и повреждает ее. Ионы цинка способны проходить через клеточную мембрану и проникать внутрь бактерий, вступая в реакцию с активным белком и $-\text{SH}$ и $-\text{NH}_2$ в ядре, так что белок денатурируется, а активность клеточной синтетазы снижается [48].

САМООЧИЩАЮЩИЙСЯ ТЕКСТИЛЬ

Свойство самоочищения текстильных материалов реализуется по трем основным механизмам: физическое самоочищение – в основном имитирует поверхность листьев лотоса и характеризуется измерением угла контакта с водой и угла скольжения, таким образом проявляется эффект водоотталкивания, химическая самоочистка – относится к разложению цветного пятна или раствора загрязнения с помощью фотокаталитического эффекта, биологическая самоочистка – осуществляется за счет активности различных групп микроорганизмов.

Водоотталкивающим считается материал, в котором поверхностное натяжение ткани снижено

за счет гидрофобного соединения. Поры в этом процессе отделки не заполняются, поэтому этот тип текстиля проницаем для воздуха и водяного пара. Склонность текстильных материалов к сопротивлению намоканию выявляют путем измерения угла контакта воды с подложкой. Когда угол контакта меньше 90° градусов, ткань смачивается. Когда угол превышает 90° градусов, ткань является водоотталкивающей или не смачиваемой, такие материалы называют гидрофобными [49].

Однако для практического применения актуальными становятся супергидрофобные материалы ($150^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$), способные с легкостью отталкивать воду и грязь, обеспечивая долговечность и устойчивость к воздействию влаги и развитию патогенной флоры для плесени и микроорганизмов. Такие материалы обладают низким коэффициентом поверхностного натяжения, что делает их идеальными для использования в условиях повышенной влажности. Супергидрофобные свойства особенно востребованы для производства специализированной одежды, для занятий активными видами спорта, и для создания защитной рабочей одежды.

К наиболее распространенным методам получения устойчивых супергидрофобных текстильных поверхностей относятся физико-химические подходы, такие как нанесение покрытий погружением [50], мокрое химическое осаждение [51–53], электрохимическое осаждение [54, 55], напыляемое покрытие [56], золь-гель [57, 58], химическое травление [59, 60], химическое осаждение из паровой фазы [61, 62], плазменная обработка [63, 64], и полимерная пришивка [65, 66].

Текстильные материалы с самоочищающими свойствами могут быть использованы для эффективного разделения масла и воды, для чего применяется одновременно два подхода. Во-первых, создается специальная шероховатая структура на поверхности ткани. Во-вторых, проводится обработка материала различными химическими составами.

Разработан супергидрофобный целлюлозный материал с устойчивым эффектом заключительной отделки для разделения смесей масла и воды. Для модификации использовали хлопок, чтобы придать ему селективную способность к адсорбции масла при контакте с водой. Полученный материал показал высокую эффективность разделения – до 98% для различных масляных веществ, таких как трихлорметан, *n*-гексан, *n*-декан. Материал сохранял свои свойства в течение 10 циклов использования, что указывает на его долговечность и устойчивость достигнутого эффекта [67].

В научно-технической литературе есть сведения о самоочищающейся поверхности хлопчатобумажной ткани, покрытой супергидрофобной и суперолеофобной тонкой композитной полимерной пленкой, состоящей из наночастиц модифицированного SiO_2 и фторполимера [68]. Описан простой двухэтапный метод нанесения покрытия методом погружения. Этот способ можно использовать для создания потенциально перспективных супергидрофобных и суперолеофобных тканевых материалов как бытового, так и технического назначения.

Также возможно создание супергидрофобной хлопковой ткани с использованием наночастиц ZnO и последующей модификации поверхности гексаметилдисилазаном. Наночастицы ZnO наносятся на поверхность материала методом пропитки, после чего проводится гидрофобная обработка. В результате получают ткани с высоким контактным углом смачивания 152° , сохраняющим свои свойства даже после 35 стирок [69].

Для получения водоотталкивающего материала хлопчатобумажное волокно модифицируют наночастицами диоксида кремния (SiO_2) на силосановой основе. Полученная ткань приобретает начальный угол смачивания более 150° и высокую устойчивость к воздействию кислот и щелочей в течение 24 ч [70].

Разработан способ получения супергидрофобного покрытия путем модификации поверхности наночастиц кремнезема составом на основе (3-аминопропил) триэтоксисиланом (APTES) и гексадецилтриметоксисиланом (HDTMS). В этом случае APTES стабилизирует дисперсию наночастиц кремнезема в воде, а также усиливает адгезию модифицированных наночастиц к поверхности ткани. Наночастицы SiO_2 и HDTMS способствуют получению супергидрофобных свойств за счет повышения шероховатости поверхности и уменьшения свободной поверхностной энергии. Супергидрофобные свойства подтверждаются достижением значений краевых углов смачивания поверхности хлопко-полиэфирной ткани каплей воды объемом 2 мкл более 150° [71].

Диоксид титана также является одним из наиболее часто используемых агентов при создании текстиля с самоочищающимися свойствами [72, 73]. Когда поверхность, покрытая TiO_2 , подвергается солнечному излучению, индуцированные радикалы на поверхности текстиля могут раз-

лагать органические вещества, такие как грязь, пятна, бактерии и другие материалы, до углекислого газа и воды [74].

Использована комбинация фотоактивного агента TiO_2 и супергидрофобного агента SiO для получения свойства фотокаталитического самоочищения на супергидрофобных хлопчатобумажных тканях. Хлопчатобумажные ткани, покрытые композитными частицами $\text{TiO}_2\text{-SiO}$, обладают супергидрофобностью с краевым углом смачивания водой 160° [75].

В другом исследовании рассматриваются современные технологии создания самоочищающихся тканей с использованием нанопокровов на основе диоксида титана (TiO_2) и оксида цинка (ZnO). Проанализирован ряд методов нанесения покрытий, включая гидротермальный синтез, золь-гель метод, электроформование, а также использование различных связующих. Полученные материалы показали высокую степень самоочищения и устойчивость к бактериальному загрязнению [76].

ВЫВОДЫ

Из проведенного анализа последних научных исследований по применению неорганических наночастиц для модификации текстильных материалов открываются широкие перспективы создания многофункциональных тканей с антибактериальным эффектом и свойствами гидро-, олеофобности и самоочистки. Такие материалы демонстрируют высокую эффективность благодаря уникальным физико-химическим характеристикам наночастиц металлов и их оксидов, которые обеспечивают стабильное функциональное действие. Внедрение нанотехнологий в текстильную промышленность расширяет функциональные возможности материалов и способствует развитию устойчивых технологий, соответствующих современным требованиям к защите здоровья и окружающей среды. Однако для широкого коммерческого внедрения, необходимо решить задачи повышения долговечности покрытий, снижения токсичности некоторых наноматериалов и оптимизации экологичности производственных процессов.

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

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

ЛИТЕРАТУРА

REFERENCES

1. Sankaran A., Kamboj A., Samant L., Jose S. // *Innovative and emerging technologies for textile dyeing and finishing*. 2021. P. 301–324. DOI: 10.1002/9781119710288.ch11.
2. Абилкасова С. // Докл. НАН РК. 2024. № 1. С. 259–270. DOI:10.32014/2024.2518-1483.271.
3. Selishchev D., Stepanov G., Sergeeva M., Solovyeva M., Zhuravlev E., Komissarov A., Richter V., Kozlov D. // *Catalysts*. 2022. V. 12. N 11. P. 1298. DOI: 10.3390/catal12111298.
4. Cheng X.W., Xuan K., Guan J.P., Liu W., Chen G. // *Colloids Surf. A*. 2023. V. 676. P. 1298. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2023.132287.
5. Faisal S., Naqvi S., Ali M., Lin L. // *Pigment Resin Technol.* 2022. V. 51. N 3. P. 301–308. DOI: 10.1108/PRT-02-2021-0017.
6. Abd El-Aziz E., Zayed M., Mohamed A.L., Hassabo A.G. // *Polymers*. 2023. N 15(14). P 3047. DOI: 10.3390/polym15143047.
7. 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.
8. Harhoosh A.A., Yurtov E.V. // *Int. J. Nanotechnol.* 2024. V. 21. N 1–2. P. 38–48. DOI: 10.1504/IJNT.2024.136506.
9. Wang X., Lu Y., Zhang Q., Wang K., Carmalt C.J., Parkin I.P., Zhang Z., Zhang X. // *J. Colloid Interface Sci.* 2021. V. 582. P. 301–311. DOI: 10.1016/j.jcis.2020.07.084.
10. Abramova A.V., Abramov V.O., Fedulov I.S., Baranchikov A.E., Kozlov D.A., Veselova V.O., Kamenewa S.V., Ivanov V.K., Cravotto G. // *Nanomaterials*. 2021. V. 11. N 10. P. 2704. DOI: 10.3390/nano11102704.
11. Ahmad N., Rasheed S., Nabeel M.I., Ahmad W., Mohyuddin A., Musharraf S.G., Najam-ul-Haq M., Hussain D. // *Langmuir*. 2023. V. 39. N 33. P. 11571–11581. DOI: 10.1021/acs.langmuir.3c01002.
12. Riabchykov M., Sychov Y., Alekszndrov O., Nikulina A. // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* Bristol: IOP Publ. 2021. V. 1031. N 1. Art. 012036. DOI: 10.1088/1757-899X/1031/1/012036.
13. Cao C., Wang F., Lu M., Zhou Y. // *Mater. Chem. Phys.* 2023. V. 307. Art. 128127. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2023.128127.
14. Тауссарова Б.Р. // Докл. НАН РК. 2023. № 346 (2). С. 180–193. DOI: 10.32014/2023.2518-1483.219.
15. 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.
16. 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.
17. Dolez P.I., Benaddi H. // *Advanced characterization and testing of textiles*. Woodhead Publishing. 2018. P. 151–188. DOI: 10.1016/B978-0-08-100453-1.00008-8.
18. 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.
19. Faravar P., Zarei Z., Monjezi M.G. // *J. Environ. Chem. Eng.* 2020. V. 8. N 4. Art. 103946. DOI: 10.1016/j.jece.2020.103946.
1. Sankaran A., Kamboj A., Samant L., Jose S. // *Innovative and emerging technologies for textile dyeing and finishing*. 2021. P. 301–324. DOI: 10.1002/9781119710288.ch11.
2. Абилкасова С. // Докл. НАН РК. 2024. № 1. С. 259–270. DOI:10.32014/2024.2518-1483.271.
3. Selishchev D., Stepanov G., Sergeeva M., Solovyeva M., Zhuravlev E., Komissarov A., Richter V., Kozlov D. // *Catalysts*. 2022. V. 12. N 11. P. 1298. DOI: 10.3390/catal12111298.
4. Cheng X.W., Xuan K., Guan J.P., Liu W., Chen G. // *Colloids Surf. A*. 2023. V. 676. P. 1298. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2023.132287.
5. Faisal S., Naqvi S., Ali M., Lin L. // *Pigment Resin Technol.* 2022. V. 51. N 3. P. 301–308. DOI: 10.1108/PRT-02-2021-0017.
6. Abd El-Aziz E., Zayed M., Mohamed A.L., Hassabo A.G. // *Polymers*. 2023. N 15(14). P 3047. DOI: 10.3390/polym15143047.
7. 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. N 9. P. 89–95. (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20236609.6825.
8. Harhoosh A.A., Yurtov E.V. // *Int. J. Nanotechnol.* 2024. V. 21. N 1–2. P. 38–48. DOI: 10.1504/IJNT.2024.136506.
9. Wang X., Lu Y., Zhang Q., Wang K., Carmalt C.J., Parkin I.P., Zhang Z., Zhang X. // *J. Colloid Interface Sci.* 2021. V. 582. P. 301–311. DOI: 10.1016/j.jcis.2020.07.084.
10. Abramova A.V., Abramov V.O., Fedulov I.S., Baranchikov A.E., Kozlov D.A., Veselova V.O., Kamenewa S.V., Ivanov V.K., Cravotto G. // *Nanomaterials*. 2021. V. 11. N 10. P. 2704. DOI: 10.3390/nano11102704.
11. Ahmad N., Rasheed S., Nabeel M.I., Ahmad W., Mohyuddin A., Musharraf S.G., Najam-ul-Haq M., Hussain D. // *Langmuir*. 2023. V. 39. N 33. P. 11571–11581. DOI: 10.1021/acs.langmuir.3c01002.
12. Riabchykov M., Sychov Y., Alekszndrov O., Nikulina A. // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* Bristol: IOP Publ. 2021. V. 1031. N 1. Art. 012036. DOI: 10.1088/1757-899X/1031/1/012036.
13. Cao C., Wang F., Lu M., Zhou Y. // *Mater. Chem. Phys.* 2023. V. 307. Art. 128127. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2023.128127.
14. Тауссарова Б.Р. // Докл. НАН РК. 2023. N 346 (2). P. 180–193. (in Russian). DOI: 10.32014/2023.2518-1483.219.
15. 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.
16. 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. (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20226506.6628.
17. Dolez P.I., Benaddi H. // *Advanced characterization and testing of textiles*. Woodhead Publishing. 2018. P. 151–188. DOI: 10.1016/B978-0-08-100453-1.00008-8.
18. 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. (in Russian). DOI: 10.6060/rcj.2024684.14.
19. Faravar P., Zarei Z., Monjezi M.G. // *J. Environ. Chem. Eng.* 2020. V. 8. N 4. Art. 103946. DOI: 10.1016/j.jece.2020.103946.

20. Струтынський А.В. Внутренние болезни. Система органов дыхания (2-е издание). М.: МЕ Дпресс-информ. 2015. 368 с.
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. Хина А.Г., Крутяков Ю.А. // *Прикл. биохим. и микробиол.* 2021. Т. 57. № 6. С. 523–535. DOI: 10.31857/S0555109921060052.
23. Simončič B., Klemenčič D. // *Text. Res. J.* 2016. V. 86. N 3. P. 210–223. DOI: 10.1177/0040517515586157.
24. Tremiliosi G.C., Simoes Luiz Gustavo P., Minozzi D.T., Santos R.I., Vilela D.C.B., Durigon E.L., Machado R.R.G., Medina D.S., Ribeiro L.K., Viana Rosa I.L., Assis M., Andrés J., Longo E., Freitas-Junior L.H. // *BioRxiv*. 2020. Art. 2020.06.26.152520. DOI: 10.1101/2020.06.26.152520.
25. Ilić V., Šaponjić Z., Vodnik V., Molina R., Dimitrijević S., Jovančić P., Nedeljković J., Radetić M. // *J. Mater. Sci.* 2009. V. 44. P. 3983–3990. DOI: 10.1007/s10853-009-3547-z.
26. Montazer M., Alimohammadi F., Shamei A., Rahimi M.K. // *Colloids Surf. B.* 2012. V. 89. P. 196–202. DOI: 10.1016/j.colsurfb.2011.09.015.
27. Cui L., Chen P., Chen S., Yuan Z., Yu C., Ren B., Zhang K. // *Anal. Chem.* 2013. V. 85. N 11. P. 5436–5443. DOI: 10.1021/ac400245j.
28. Ibrahim H.M., Hassan M.S. // *Carbohydr. Polym.* 2016. V. 151. P. 841–850. DOI: 10.1016/j.carbpol.2016.05.041.
29. Foltynowicz Z., Gwiazdowska D., Rodewald D., Nowaczyk A., Filipiak M. // *Fibres Text. East. Eur.* 2013. V. 21. N 5. P. 91–96.
30. Dubas S.T., Kumlangdudsana P., Potiyaraj P. // *Colloids Surf. B.* 2006. V. 48. N 2. P. 105–109. DOI: 10.1016/j.colsurfb.2006.04.012.
31. Bhaumik A.K., Gupta A.K. // *Curr. Sci.* 2007. V. 92. N 2. P. 192–199.
32. Mirjalili M., Yaghmaei N., Mirjalili M. // *J. Nanostruct. Chem.* 2013. V. 3. Art. 43. DOI: 10.1186/2193-8865-3-43.
33. Vankar P.S., Shukla D. // *Appl. Nanosci.* 2012. V. 2. P. 163–168. DOI: 10.1007/s13204-011-0051-y.
34. Zare E.N., Padil V.V.T., Mokhtari B., Venkateshaiah A., Wacławek S., Černík M., Tay F.R., Varma R.S., Makvandi P. // *Adv. Colloid Interface Sci.* 2020. V. 283. P. 102236. DOI: 10.1016/j.cis.2020.102236.
35. 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/R CJ.2024682.1.
36. Zhou F., Zhu Y., Yang L., Yang D.Q., Sacher E. // *Colloids Surf. A.* 2022. V. 632. P. 127831. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2021.127831.
37. Tao Y., Zhou F., Wang K., Yang D., Sacher E. // *Molecules*. 2022. V. 27. N 21. P. 6951. DOI: 10.3390/molecules27216951.
38. Zhu Y., Zhou F., Hu J., Yang L., Yang D.Q., Sacher E. // *Colloids Surf. A.* 2021. V. 626. P. 127116. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2021.127116.
39. Fan X., Yahia L.H., Sacher E. // *Biology*. 2021. V. 10. N 2. P. 137. DOI: 10.3390/biology10020137.
40. Zhou F., Peng J., Tao Y., Yang L., Yang D., Sacher E. // *Molecules*. 2023. V. 28. N 14. P. 5446. DOI: 10.3390/molecules28145446.
41. Mohan S., Devan M.V., Sambathkumar S., Shanmugam V., Ravikumar K., Marnadu R., Palanivel B., Hegazy
20. Strutyński A.V. Internal Medicine: The Respiratory System (2nd Edition). Moscow: MEDpress-inform. 2015. 368 p. (in Russian).
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., Zimmurov A.R., Bykov F.A., Melnikov A.G. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 7. P. 173-184. (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20236607.6844j.
22. Khina A.G., Krutyakov Yu.A. // *Applied Biochemistry and Microbiology*. 2021. V. 57. N 6. P. 523–535. (in Russian). DOI: 10.31857/S0555109921060052.
23. Simončič B., Klemenčič D. // *Text. Res. J.* 2016. V. 86. N 3. P. 210–223. DOI: 10.1177/0040517515586157.
24. Tremiliosi G.C., Simoes Luiz Gustavo P., Minozzi D.T., Santos R.I., Vilela D.C.B., Durigon E.L., Machado R.R.G., Medina D.S., Ribeiro L.K., Viana Rosa I.L., Assis M., Andrés J., Longo E., Freitas-Junior L.H. // *BioRxiv*. 2020. Art. 2020.06.26.152520. DOI: 10.1101/2020.06.26.152520.
25. Ilić V., Šaponjić Z., Vodnik V., Molina R., Dimitrijević S., Jovančić P., Nedeljković J., Radetić M. // *J. Mater. Sci.* 2009. V. 44. P. 3983–3990. DOI: 10.1007/s10853-009-3547-z.
26. Montazer M., Alimohammadi F., Shamei A., Rahimi M.K. // *Colloids Surf. B.* 2012. V. 89. P. 196–202. DOI: 10.1016/j.colsurfb.2011.09.015.
27. Cui L., Chen P., Chen S., Yuan Z., Yu C., Ren B., Zhang K. // *Anal. Chem.* 2013. V. 85. N 11. P. 5436–5443. DOI: 10.1021/ac400245j.
28. Ibrahim H.M., Hassan M.S. // *Carbohydr. Polym.* 2016. V. 151. P. 841–850. DOI: 10.1016/j.carbpol.2016.05.041.
29. Foltynowicz Z., Gwiazdowska D., Rodewald D., Nowaczyk A., Filipiak M. // *Fibres Text. East. Eur.* 2013. V. 21. N 5. P. 91–96.
30. Dubas S.T., Kumlangdudsana P., Potiyaraj P. // *Colloids Surf. B.* 2006. V. 48. N 2. P. 105–109. DOI: 10.1016/j.colsurfb.2006.04.012.
31. Bhaumik A.K., Gupta A.K. // *Curr. Sci.* 2007. V. 92. N 2. P. 192–199.
32. Mirjalili M., Yaghmaei N., Mirjalili M. // *J. Nanostruct. Chem.* 2013. V. 3. Art. 43. DOI: 10.1186/2193-8865-3-43.
33. Vankar P.S., Shukla D. // *Appl. Nanosci.* 2012. V. 2. P. 163–168. DOI: 10.1007/s13204-011-0051-y.
34. Zare E.N., Padil V.V.T., Mokhtari B., Venkateshaiah A., Wacławek S., Černík M., Tay F.R., Varma R.S., Makvandi P. // *Adv. Colloid Interface Sci.* 2020. V. 283. P. 102236. DOI: 10.1016/j.cis.2020.102236.
35. Дымникова Н.С., Ерохина Е.В., Кузнецов О.Ю. // *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва)*. 2024. V. 68. N 2. P. 3-12. (in Russian). DOI: 10.6060/R CJ.2024682.1.
36. Zhou F., Zhu Y., Yang L., Yang D.Q., Sacher E. // *Colloids Surf. A.* 2022. V. 632. P. 127831. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2021.127831.
37. Tao Y., Zhou F., Wang K., Yang D., Sacher E. // *Molecules*. 2022. V. 27. N 21. P. 6951. DOI: 10.3390/molecules27216951.
38. Zhu Y., Zhou F., Hu J., Yang L., Yang D.Q., Sacher E. // *Colloids Surf. A.* 2021. V. 626. P. 127116. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2021.127116.
39. Fan X., Yahia L.H., Sacher E. // *Biology*. 2021. V. 10. N 2. P. 137. DOI: 10.3390/biology10020137.
40. Zhou F., Peng J., Tao Y., Yang L., Yang D., Sacher E. // *Molecules*. 2023. V. 28. N 14. P. 5446. DOI: 10.3390/molecules28145446.
41. Mohan S., Devan M.V., Sambathkumar S., Shanmugam V., Ravikumar K., Marnadu R., Palanivel B., Hegazy

- H.H. // *Appl. Nanosci.* 2021. V. 11. P. 1565–1574. DOI: 10.1007/s13204-021-01811-w.
42. Zielińska A., Kowalska E., Sobczak J.W., Łacka I., Gazda M., Ohtani B., Hupka J., Zaleska A. // *Sep. Purif. Technol.* 2010. V. 72. N 3. P. 309–318. DOI: 10.1016/j.seppur.2010.03.002.
 43. Dastjerdi R., Montazer M. // *Colloids Surf. B.* 2010. V. 79. N 1. P. 5–18. DOI: 10.1016/j.colsurfb.2010.03.029.
 44. Zhou H., Zhang Y. // *J. Phys. Chem. C.* 2014. V. 118. N 11. P. 5626–5636. DOI: 10.1021/jp4082883.
 45. Wang X., Li Z., Shi J., Yu Y. // *Chem. Rev.* 2014. V. 114. N 19. P. 9346–9384. DOI: 10.1021/cr400633s.
 46. Rahimi N., Pax R.A., Gray E.M.A. // *Prog. Solid State Chem.* 2016. V. 44. N 3. P. 86–105. DOI: 10.1016/j.progsolidstchem.2016.07.002.
 47. Tudu B.K., Sinhamahapatra A., Kumar A. // *ACS Omega.* 2020. V. 5. N 14. P. 7850–7860. DOI: 10.1021/acsomega.9b04067.
 48. Ткачук В.А., Лютова Е.С., Бузаев А.А., Борило Л.П., Спивакова Л.Н. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2024. Т. 67. Вып. 5.С. 70–76. DOI: 10.6060/ivkkt.20246705.6953.
 49. Flores-Vivian I., Hejazi V., Kozhukhova M.I., Nosonovsky M., Sobolev K. // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2013. V. 5. N 24. P. 13284–13294. DOI: 10.1021/am404272v.
 50. Xu B., Ding Y., Qu S., Cai Z. // *Appl. Surf. Sci.* 2015. V. 356. P. 951–957. DOI: 10.1016/j.apsusc.2015.08.180.
 51. Hu H., Wang J., Wang Y., Gee E., Liu G. // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2017. V. 9. N 10. P. 9029–9037. DOI: 10.1021/acsami.7b00126.
 52. Wu X., Wyman I., Zhang G., Lin J., Liu Z., Wang Y., Hu H. // *Prog. Org. Coat.* 2016. V. 90. P. 463–471. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2015.08.008.
 53. Zhang M., Li J., Zang D., Lu Y., Gao Z., Shi J., Wang C. // *Carbohydr. Polym.* 2016. V. 137. P. 264–270. DOI: 10.1016/j.carbpol.2015.10.087.
 54. Joung Y.S., Buie C.R. // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2015. V. 7. N 36. P. 20100–20110. DOI: 10.1021/acsami.5b05233.
 55. Luo Y., Li J., Zhu J., Zhao Y., Gao X. // *Angew. Chem. Int. Ed.* 2015. V. 54. N 16. P. 4876–4879. DOI: 10.1002/anie.201500137.
 56. Liu H., Al-Deyab S.S., Lai Y.K., Gao S.W., Cai J.S., He C.L., Mao J.J., Zhu T.X., Chen Z., Huang J.Y., Meng K., Zhang K.Q. // *Materials.* 2016. V. 9. N 3. P. 124. DOI: 10.3390/ma9030124.
 57. Gurav A.B., Xu Q., Latthe S.S., Vhatkar R.S., Liu S., Yoon H., Yoon S. S. // *Ceram. Int.* 2015. V. 41. N 2. P. 3017–3023. DOI: 10.1016/j.ceramint.2014.10.137.
 58. Zhu T., Cai C., Duan C., Zhai S., Liang S., Jin Y., Zhao N., Xu J. // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2015. V. 7. N 25. P. 13996–14003. DOI: 10.1021/acsami.5b03056.
 59. Wu L., Zhang J., Li B., Fan L., Li L., Wang A. // *J. Colloid Interface Sci.* 2014. V. 432. P. 31–42. DOI: 10.1016/j.jcis.2014.06.046.
 60. Huang J.Y., Lai Y.K., Wang L.N., Li S.H., Ge M.Z., Zhang K.Q., Fuchs H., Chi L.F. // *J. Mater. Chem. A.* 2014. V. 2. N 43. P. 18531–18538. DOI: 10.1039/C4TA04090B.
 61. Bao X.M., Cui J.F., Sun H.X., Liang W.D., Zhu Z.Q., An J., Yang B.P., La P.Q., Li A. // *Appl. Surf. Sci.* 2014. V. 303. P. 473–480. DOI: 10.1016/j.apsusc.2014.03.029.
 62. Aminayi P., Abidi N. // *Appl. Surf. Sci.* 2013. V. 287. P. 223–231. DOI: 10.1016/j.apsusc.2013.09.132.
 63. Caschera D., Mezzi A., Cerri L., de Caro T., Riccucci C., Ingo G.M., Padeletti G., Biasiucci M., Gigli G., Cortese B.
 - H.H. // *Appl. Nanosci.* 2021. V. 11. P. 1565–1574. DOI: 10.1007/s13204-021-01811-w.
 42. Zielińska A., Kowalska E., Sobczak J.W., Łacka I., Gazda M., Ohtani B., Hupka J., Zaleska A. // *Sep. Purif. Technol.* 2010. V. 72. N 3. P. 309–318. DOI: 10.1016/j.seppur.2010.03.002.
 43. Dastjerdi R., Montazer M. // *Colloids Surf. B.* 2010. V. 79. N 1. P. 5–18. DOI: 10.1016/j.colsurfb.2010.03.029.
 44. Zhou H., Zhang Y. // *J. Phys. Chem. C.* 2014. V. 118. N 11. P. 5626–5636. DOI: 10.1021/jp4082883.
 45. Wang X., Li Z., Shi J., Yu Y. // *Chem. Rev.* 2014. V. 114. N 19. P. 9346–9384. DOI: 10.1021/cr400633s.
 46. Rahimi N., Pax R.A., Gray E.M.A. // *Prog. Solid State Chem.* 2016. V. 44. N 3. P. 86–105. DOI: 10.1016/j.progsolidstchem.2016.07.002.
 47. Tudu B.K., Sinhamahapatra A., Kumar A. // *ACS Omega.* 2020. V. 5. N 14. P. 7850–7860. DOI: 10.1021/acsomega.9b04067.
 48. Tkachuk V.A., Lyutova E.S., Buzaev A.A., Borilo L.P., Spivakova L.N. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2024. V. 67. N 5. P. 70–76. DOI: 10.6060/ivkkt.20246705.6953.
 49. Flores-Vivian I., Hejazi V., Kozhukhova M.I., Nosonovsky M., Sobolev K. // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2013. V. 5. N 24. P. 13284–13294. DOI: 10.1021/am404272v.
 50. Xu B., Ding Y., Qu S., Cai Z. // *Appl. Surf. Sci.* 2015. V. 356. P. 951–957. DOI: 10.1016/j.apsusc.2015.08.180.
 51. Hu H., Wang J., Wang Y., Gee E., Liu G. // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2017. V. 9. N 10. P. 9029–9037. DOI: 10.1021/acsami.7b00126.
 52. Wu X., Wyman I., Zhang G., Lin J., Liu Z., Wang Y., Hu H. // *Prog. Org. Coat.* 2016. V. 90. P. 463–471. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2015.08.008.
 53. Zhang M., Li J., Zang D., Lu Y., Gao Z., Shi J., Wang C. // *Carbohydr. Polym.* 2016. V. 137. P. 264–270. DOI: 10.1016/j.carbpol.2015.10.087.
 54. Joung Y.S., Buie C.R. // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2015. V. 7. N 36. P. 20100–20110. DOI: 10.1021/acsami.5b05233.
 55. Luo Y., Li J., Zhu J., Zhao Y., Gao X. // *Angew. Chem. Int. Ed.* 2015. V. 54. N 16. P. 4876–4879. DOI: 10.1002/anie.201500137.
 56. Liu H., Al-Deyab S.S., Lai Y.K., Gao S.W., Cai J.S., He C.L., Mao J.J., Zhu T.X., Chen Z., Huang J.Y., Meng K., Zhang K.Q. // *Materials.* 2016. V. 9. N 3. P. 124. DOI: 10.3390/ma9030124.
 57. Gurav A.B., Xu Q., Latthe S.S., Vhatkar R.S., Liu S., Yoon H., Yoon S. S. // *Ceram. Int.* 2015. V. 41. N 2. P. 3017–3023. DOI: 10.1016/j.ceramint.2014.10.137.
 58. Zhu T., Cai C., Duan C., Zhai S., Liang S., Jin Y., Zhao N., Xu J. // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2015. V. 7. N 25. P. 13996–14003. DOI: 10.1021/acsami.5b03056.
 59. Wu L., Zhang J., Li B., Fan L., Li L., Wang A. // *J. Colloid Interface Sci.* 2014. V. 432. P. 31–42. DOI: 10.1016/j.jcis.2014.06.046.
 60. Huang J.Y., Lai Y.K., Wang L.N., Li S.H., Ge M.Z., Zhang K.Q., Fuchs H., Chi L.F. // *J. Mater. Chem. A.* 2014. V. 2. N 43. P. 18531–18538. DOI: 10.1039/C4TA04090B.
 61. Bao X.M., Cui J.F., Sun H.X., Liang W.D., Zhu Z.Q., An J., Yang B.P., La P.Q., Li A. // *Appl. Surf. Sci.* 2014. V. 303. P. 473–480. DOI: 10.1016/j.apsusc.2014.03.029.
 62. Aminayi P., Abidi N. // *Appl. Surf. Sci.* 2013. V. 287. P. 223–231. DOI: 10.1016/j.apsusc.2013.09.132.
 63. Caschera D., Mezzi A., Cerri L., de Caro T., Riccucci C., Ingo G.M., Padeletti G., Biasiucci M., Gigli G., Cortese B.

- // *Cellulose*. 2014. V. 21. P. 741–756. DOI: 10.1007/s10570-013-0123-0.
64. Caschera D., Toro R.G., Federici F., Riccucci C., Ingo G.M., Gigli G., Cortese B. // *Cellulose*. 2015. V. 22. N 4. P. 2797–2809. DOI: 10.1007/s10570-015-0661-8.
 65. Wu J., Jiang Y., Jiang D., He J., Cai G., Wang J. // *Mater. Lett.* 2015. V. 160. P. 384–387. DOI: 10.1016/j.matlet.2015.07.146.
 66. Li S.H., Huang J.Y., Ge M.Z., Li S.W., Xing T.L., Chen G.Q., Liu Y.Q., Zhang K.Q., Al-Deyab S.S., Lai Y.K. // *Mater. Des.* 2015. V. 85. P. 815–822. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.07.083.
 67. Hou C., Gui Q., Song J., Fan Z. // *Colloids Surf. A*. 2025. V. 709. P. 136157. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2025.136157.
 68. Lin J., Zheng C., Ye W.J., Wang H.Q., Feng D.Y., Li Q.Y., Huan B.W. // *J. Appl. Polym. Sci.* 2015. V. 132. N 1. DOI: 10.1002/app.41458.
 69. Patil G.D., Patil A.H., Jadhav S.A., Patil C.R., Patil P.S. // *Mater. Lett.* 2019. V. 255. Art. 126562. DOI: 10.1016/j.matlet.2019.126562.
 70. Kong Q., Li Z. // *AATCC J. Res.* 2024. V. 11. N 6. P. 487–496. DOI: 10.1177/24723444241276005.
 71. Zhao Q., Wu L.Y.L., Huang H., Liu Y. // *Mater. Des.* 2016. V. 92. P. 541–545. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.12.054.
 72. Chokesawatanaakit N., Thammasang S., Phanthanawiboon S., Knijnenburg J.T., Theerakulpisut S., Kamwilaisak K. // *Int. J. Biol. Macromol.* 2024. V. 256. P. 128321. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.128321.
 73. Тхи Лан Фам, Тхи Нгоан Нгуен, Ван Куонг Буй, Анх Сон Нгуен, Чонг Хиен Дао, Тхи Тхюй Нгуен, Тхи Ми Хань Ле, Минь Нгок Нгуен, Фуонг Лан Ву, Дай Лам Тран. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2024. Т. 67. Вып. 1. С. 128–135. DOI: 10.6060/ivkkt.20246701.6962.
 74. Veronovski N., Rudolf A., Smole M.S., Kreže T., Geršak J. // *Fibers Polym.* 2009. V. 10. N 4. P. 551–556. DOI: 10.1007/s12221-009-0551-5.
 75. Xu B., Ding J., Feng L., Ding Y., Ge F., Cai Z.S. // *Surf. Coat. Technol.* 2015. V. 262. P. 70–76. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2014.12.017.
 76. Saad S.R., Mahmed N., Abdullah M.M.A.B., Sandu A.V. // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2016. V. 133. N 1. Art. 012028. DOI: 10.1088/1757-899X/133/1/012028.
 64. Caschera D., Toro R.G., Federici F., Riccucci C., Ingo G.M., Gigli G., Cortese B. // *Cellulose*. 2015. V. 22. N 4. P. 2797–2809. DOI: 10.1007/s10570-015-0661-8.
 65. Wu J., Jiang Y., Jiang D., He J., Cai G., Wang J. // *Mater. Lett.* 2015. V. 160. P. 384–387. DOI: 10.1016/j.matlet.2015.07.146.
 66. Li S.H., Huang J.Y., Ge M.Z., Li S.W., Xing T.L., Chen G.Q., Liu Y.Q., Zhang K.Q., Al-Deyab S.S., Lai Y.K. // *Mater. Des.* 2015. V. 85. P. 815–822. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.07.083.
 67. Hou C., Gui Q., Song J., Fan Z. // *Colloids Surf. A*. 2025. V. 709. P. 136157. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2025.136157.
 68. Lin J., Zheng C., Ye W.J., Wang H.Q., Feng D.Y., Li Q.Y., Huan B.W. // *J. Appl. Polym. Sci.* 2015. V. 132. N 1. DOI: 10.1002/app.41458.
 69. Patil G.D., Patil A.H., Jadhav S.A., Patil C.R., Patil P.S. // *Mater. Lett.* 2019. V. 255. Art. 126562. DOI: 10.1016/j.matlet.2019.126562.
 70. Kong Q., Li Z. // *AATCC J. Res.* 2024. V. 11. N 6. P. 487–496. DOI: 10.1177/24723444241276005.
 71. Zhao Q., Wu L.Y.L., Huang H., Liu Y. // *Mater. Des.* 2016. V. 92. P. 541–545. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.12.054.
 72. Chokesawatanaakit N., Thammasang S., Phanthanawiboon S., Knijnenburg J.T., Theerakulpisut S., Kamwilaisak K. // *Int. J. Biol. Macromol.* 2024. V. 256. P. 128321. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.128321.
 73. Thi Lan Pham, Thi Ngoan Nguyen, Van Cuong Bui, Anh Son Nguyen, Trong Hien Dao, Thi Thuy Nguyen, Thi My Hanh Le, Minh Ngoc Nguyen, Phuong Lan Vu, Dai Lam Tran. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2024. V. 67. N 1. P. 128–135. DOI: 10.6060/ivkkt.20246701.6962.
 74. Veronovski N., Rudolf A., Smole M.S., Kreže T., Geršak J. // *Fibers Polym.* 2009. V. 10. N 4. P. 551–556. DOI: 10.1007/s12221-009-0551-5.
 75. Xu B., Ding J., Feng L., Ding Y., Ge F., Cai Z.S. // *Surf. Coat. Technol.* 2015. V. 262. P. 70–76. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2014.12.017.
 76. Saad S.R., Mahmed N., Abdullah M.M.A.B., Sandu A.V. // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2016. V. 133. N 1. Art. 012028. DOI: 10.1088/1757-899X/133/1/012028.

Поступила в редакцию 09.07.2025
Принята к опубликованию 08.10.2025

Received 09.07.2025
Accepted 08.10.2025