

УДК 678.7-036

**Л. А. Ленартович, Н. Р. Прокопчук, О. М. Касперович,
А. Ф. Петрушеня, А. Г. Любимов**

Белорусский государственный технологический университет

ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДОВ МЕТАЛЛОВ НА СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ (ОБЗОР)

Введение в полимерную матрицу дисперсных веществ органической или неорганической природы осуществляется с целью улучшения физико-химических, механических, термических, электрических, трибологических свойств. В настоящее время возрастает интерес к композициям, обладающим бактерицидными, огнестойкими, теплопроводящими, антифрикционными свойствами. Одним из перспективных направлений является разработка многофункциональных композиций, обеспечивающих одновременно повышение нескольких важных эксплуатационных характеристик при сохранении физико-механических свойств. Использование соединений металлов в полимерных матрицах может приводить к значительному повышению всех описанных характеристик. Целью данной работы является анализ влияния наноксидов металлов на свойства полимерных материалов. Наночастицы оксидов металлов имеют большие поверхностные заряды, которые связывают поверхность с полярными полимерами посредством электростатических взаимодействий. Они могут формировать одинарные связи металл – кислород с функциональными гидроксильными и карбоксильными группами в полимере, одинарные координационные связи металл – азот с функциональными группами на основе азота или водородные связи, таким образом оказывая влияние на весь комплекс свойств полимера. Наночастицы благодаря своим размерам могут выступать в роли зародышей кристаллообразования, таким образом влияя на количество образующихся кристаллов и их размер, а кристаллическое строение полимеров непосредственно связано с прочностью, т. е. способностью противостоять разрушению под действием нагрузки. Использование нанодобавок позволяет придать материалам антибактериальные свойства, а именно эффективную антибактериальную активность как против грамположительных, так и против грамотрицательных бактерий, повысить устойчивость композиций к горению и придать им фотокаталитическую активность.

Ключевые слова: полимер, оксид цинка, диоксид титана, наночастицы, полиэтилентерефталат.

Для цитирования: Ленартович Л. А., Прокопчук Н. Р., Касперович О. М., Петрушеня А. Ф., Любимов А. Г. Влияние наночастиц оксидов металлов на свойства полимерных материалов (обзор) // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2024. № 2 (283). С. 65–76.

DOI: 10.52065/2520-2669-2024-283-9.

**L. A. Lenartovich, N. R. Prokopchuk, V. M. Kasperovich,
A. F. Petrushenya, A. G. Liubimau**

Belarusian State Technological University

EFFECT OF METAL OXIDE NANOPARTICLES ON POLYMER MATERIAL PROPERTIES (REVIEW)

The introduction of dispersed substances of organic or inorganic nature into the polymer matrix is carried out with the aim of changing the physicochemical, mechanical, thermal, electrical and tribological properties. Currently, there is increasing interest in compositions with bactericidal, fire-resistant, and heat-conducting properties. One of the promising directions is the development of multifunctional compositions that simultaneously provide an increase in several important performance characteristics while maintaining physical and mechanical properties. The use of metal compounds in polymer matrices can lead to a significant increase in the described characteristics. The purpose of this work is to analyze the influence of metal nanooxides on various properties of polymer materials. Metal oxide nanoparticles have large surface charges that bind the surface to polymers through electrostatic interactions. They can also form metal-oxygen single bonds with alcohol functional groups in the polymer, metal-nitrogen single coordination bonds with nitrogen-based functional groups, or hydrogen bonds, thereby influencing the entire range of properties of the polymer. Due to their size, nanoparticles can act as nuclei for crystal formation, thus influencing the number of crystals formed and their size. And the crystalline structure of polymers is directly related to strength, i.e. ability to resist destruction under load. The use of nanoadditives makes it possible to impart antibacterial properties, increase the resistance to combustion and impart photocatalytic activity.

Keywords: polymer, zinc oxide, titanium dioxide, nanoparticles, polyethylene terephthalate.

For citation: Lenartovich L. A., Prokopchuk N. R., Kasperovich O. M., Petrushenya A. F., Liubimau A. G. Effect of metal oxide nanoparticles on polymer material properties (review). *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology*, 2024, no. 2 (283), pp. 65–76 (In Russian). DOI: 10.52065/2520-2669-2024-283-9.

Введение. Одной из важнейших областей применения полиэтилентерефталата (ПЭТ) является изготовление волокон и тканей на их основе. Ассортимент используемых в промышленных масштабах синтетических волокон достаточно узок, что накладывает определенные ограничения на спектр свойств материалов и композитов на их основе. Создание новых волокнообразующих полимеров – высокочрезвычайно затратный комплекс мероприятий, целесообразный лишь для решения специальных задач особой важности. Наиболее рациональным путем расширения спектра свойств волокон и материалов на их основе, а также качественного улучшения их характеристик является модифицирование волокнистых материалов. Трудность решения этой задачи определяется особенностями структуры синтетических волокон (высокой степенью ориентации и плотностью упаковки макромолекул в надмолекулярных образованиях, отсутствием пористости, низкой химической активностью и др.). В настоящее время благодаря успешному развитию нанотехнологий открылась возможность реализации не только поверхностного, но и объемного модифицирования синтетических волокон с использованием наноразмерных материалов, в частности наночастиц углеродных нанотрубок, фуллеренов, металлов (серебро, медь, железо, марганец, никель), их производных (TiO_2 , ZnO , MgO) и других соединений (SiO_2 , природные минералы, например магнетит, трепел, шунгит, доломит и др.) [1–6].

До сих пор преобладающим способом модификации синтетических текстильных материалов остается сорбция их поверхностью наночастиц из соответствующих суспензий, например модифицирование ПЭТ волокон бактерицидами по механизму крейзообразования или когда волокна вытягивают в контакте с модифицирующим коллоидным раствором. Разрабатываются также способы объемного модифицирования волокон, основанные на введении в расплав или раствор готового волокнообразующего полимера наноматериалов перед стадией формирования нитей [7]. Однако для полной реализации возможностей наномодифицирования необходимо, чтобы наночастицы были распределены не на поверхности волокон, а во всем их объеме, причем максимально равномерно. Этого можно добиться только вводя наноразмерные материалы на стадии синтеза полимера, когда молекулы мономера последовательно выстраиваются в макромолекулярные цепочки вместе с наночастицами.

Основная часть. В последние два десятилетия во всем мире быстрыми темпами развиваются технологии направленного получения и использования наночастиц (НЧ) преимущественно металлов [8–11].

Сегодня наиболее изучены возможности использования НЧ металлов в промышленности: при создании новых катализаторов для нужд нефтехимической промышленности (среди них наиболее перспективны НЧ марганца, алюминия, титана), для создания нового поколения сенсорной и конструкционной керамики, сорбентов (НЧ алюминия), при производстве прозрачных проводящих покрытий (НЧ серебра) [8–10]. Главным наноксидом продолжает оставаться оксид титана (TiO_2). Здания со стенами, покрытыми оксидом титана, обладают свойствами очищения (так называемый «эффект лотоса» – эффект крайне низкой смачиваемости поверхности) [12]. Популярными материалами также являются оксид кремния (SiO_2) и оксид цинка (ZnO). Последний широко используется в промышленности при нанесении композиционных покрытий с применением кластерных нанодиазотных синтезов. Можно выделить 4 основные группы приложения НЧ: биоцидные, каталитические, электрические и магнитные свойства.

Использование наночастиц соединений металлов в качестве наполнителей к полимерам позволяет значительно изменять их физико-химические свойства и получать новые материалы с высокими эксплуатационными характеристиками. Перспективно направление применения таких добавок в качестве замедлителей горения полимерных материалов. Проблема производства изделий пониженной горючести является глобальной и обусловила одно из самых актуальных в настоящее время направлений химической и текстильной отраслей промышленности [13].

Текстильные материалы на основе ПЭТ волокон широко применяются во многих отраслях промышленности, сельском хозяйстве и быту. Связано это с уникальными свойствами полиэфирных волокон: помимо высоких технических характеристик (однородность по толщине, высокая прочность, химическая стойкость, устойчивость к многократным деформациям, истиранию) изделия из них характеризуются хорошими воздухопроницаемостью, гигиеничностью и гипоаллергенностью. Почти единственный недостаток изделий из полиэфирных волокон – их высокая горючесть [14]. Достаточно эффективными методами огнезащиты синтетических волокнообразующих полимеров являются: внесение замедлителей горения в

расплав полимера, модификация химического состава монозвеньев и поверхностная обработка волокон на стадии их получения [15–18]. Вместе с тем введение замедлителей горения в реакционную смесь на стадии получения полимера или в его расплав приводит к ухудшению физико-механических и волоконобразующих свойств полимерного материала, а поверхностная пропитка замедлителями горения неустойчива к водным обработкам из-за химической инертности полиэфирного материала и бездефектности поверхности его волокон. Поэтому проблема создания волоконной продукции пониженной горючести в сочетании с высокими физико-механическими показателями является актуальной.

Неорганические соединения металлов с частицами макроразмера активно используются в качестве антипиренов, однако имеют существенный недостаток. Для достижения заданных характеристик необходимо введение более 40 мас. % добавки, что значительно ухудшает эксплуатационные свойства конечного материала и изделия на его основе. Преимущество соединений металлов с частицами наноразмера заключается в их высокой дисперсности (средний размер не превышает 100 нм), которая изменяет межфазное взаимодействие «полимер – наполнитель», позволяет равномерно распределять наполнитель в матрице полимера, а главное, значительно снизить его концентрацию для достижения заданных характеристик. Ранее нами [19] научно обоснована и экспериментально подтверждена возможность существенного упрочнения лабораторных ПЭТ мононитей, модифицированных 0,015 мас. % углеродными нанотрубками, введенными в полимер на стадии его синтеза.

В литературных источниках имеются сведения о снижении горючести полимеров с помощью наночастиц TiO_2 и ZnO , в частности полипропилена [20]. При этом предполагается, что наночастицы оксидов металлов, введенные в полипропилен в количестве 5 мас. %, подавляют процессы дымообразования за счет образования коксового остатка, влияют на формирование защитной пленки, изолирующей полимер от пламени и кислорода.

В работе [21] показано, что шерстяные и шелковые ткани, обработанные суспензией TiO_2 с концентрацией от 0,5 до 10 г/л в сочетании с обычными антипиренами, проявляют замедление горения. Согласно статье [22], частицы TiO_2 способствуют формированию физического теплоизоляционного барьера, уменьшающего передачу тепла и кислорода между пламенем и волокнами и тем самым снижающего скорость горения. Тепловые свойства текстильных материалов с покрытием TiO_2 исследовали с помощью метода термогравиметрии в атмосфере азота и воздуха [22]. Авторами установлено, что повышенная концен-

трация TiO_2 в покрытии увеличивает термическую стабильность текстильных волокон, что проявляется в повышении температуры разложения и снижении скорости разложения.

Авторами [23] было изучено влияние введения наночастиц TiO_2 и ZnO , а также их комбинаций на физические, термические, механические и антибактериальные свойства тонкой пленки из смеси ПЭТ и полибутиленсукцината (ПБС). Установлено, что добавление TiO_2 и ZnO не приводит к значительному увеличению прочности при разрыве, модуля Юнга и относительного удлинения при разрыве, однако ведет к повышению термостабильности смесей ПЭТ/ПБС.

Различные типы нанодобавок используются в качестве антипиренов для текстильных изделий для повышения огнестойкости и минимизации риска возгорания. Применение наночастиц MgO приводит к значительному повышению огнезащитных свойств. Поэтому MgO может использоваться для улучшения огнестойкости полимерных волокон [24].

Огнестойкие свойства волокон определялись с помощью предельного кислородного индекса, а также испытаний на вертикальное горение и образование дыма. Результаты показали, что использование TiO_2 увеличивало значение предельного кислородного индекса. Кроме того, покрытие ПЭТ наночастицами TiO_2 значительно ингибировало выделение дыма в течение всего процесса горения, а также плотность дыма обработанных волокон была намного ниже, чем у исходных. Превосходный эффект подавления дыма объясняется образованием вспучивающегося углеродного слоя на поверхности волокон во время горения, который образует физический защитный барьер [25]. В работе также показано, что в результате нанесения TiO_2 на текстильные подложки (в частности – ПЭТ) могут проявляться такие свойства покрытий, как фотокаталитическая самоочистка, антимикробная активность, защита от ультрафиолета, гидрофобность, термическая стабильность, огнестойкость и электропроводность.

В статье [26] установлено комплексное положительное влияние наночастиц TiO_2 на свойства ПЭТ: замедление горения и упрочнение мононитей. Предложен возможный механизм замедления горения и упрочнения, согласно которому наночастицы TiO_2 , усиливая межмолекулярные взаимодействия в ПЭТ, повышают энергии активации процессов термоокислительной, механодеструкции и горения. Одновременное замедление горения и упрочнение ПЭТ наночастицами TiO_2 , введенными в сверхмалых количествах до 0,015 мас. %, практически важно, так как позволяет улучшить эксплуатационные свойства ПЭТ нитей без существенного увеличения их стоимости.

Еще одним вариантом использования наноксидов металлов является получение эффективных и стабильных фотокаталитических покрытий, пригодных для использования в проточных водоочистных системах.

Использование диоксида титана, нанесенного на поверхность ПЭТ листов, в качестве поверхностного слоя может использоваться для очистки воды [27]. Учеными установлено, что переработанные пластиковые бутылки из-под минеральной воды могут быть эффективно использованы в качестве подложек для создания структурированных фотореакторов с пленками TiO_2 /ПЭТ. Технология, используемая для иммобилизации TiO_2 на ПЭТ-листе, обеспечивала однородное покрытие и стабильность даже после повторного использования в течение 5 последовательных циклов. Применение фотокаталитических тонких пленок диоксида титана [28], нанесенных на поверхность ПЭТ и фотосенсибилизированных натуральным и безопасным куркумином (куркума), позволило усилить фотокаталитическую деградацию стойких загрязняющих веществ.

Важное значение в производстве тканей имеет придание им специальных свойств, таких как гидрофобность, устойчивость к сминанию, хорошая окрашиваемость, устойчивость к действию воды и других растворителей [29]. В работе исследовали свойства ПЭТ ткани, обработанной коллоидным раствором TiO_2 , в результате чего ткань стала супергидрофобной, самоочищающейся, проявляющей свойства фотокаталитического разложения красителей.

Известно применение оксидов металлов для изменения электрических свойств тканей. Так, в работе [30] на поверхность ПЭТ ткани было нанесено покрытие, состоящее из нанокompозита полианилин/ TiO_2 . Присутствие наночастиц TiO_2 существенно повлияло на диэлектрические свойства (диэлектрическую проницаемость и проводимость по переменному току) ПЭТ тканей с покрытием полианилин/ TiO_2 . Ткани из ПЭТ, покрытые нанокompозитом, показали на два порядка более высокую проводимость в измеряемой частотной области по сравнению с тканью из ПЭТ, покрытой только полианилином.

Установлено [31], что предварительно обработанный додецилтриметоксисиланом диоксид титана равномерно распределяется на поверхности ПЭТ волокон. Слой гидрофобных наночастиц находится не только на внешней поверхности, но и в канавках волокон, которые имеют микро- и наношероховатости. Модифицированная ткань обладает превосходной прочностью и способна противостоять внешним повреждениям, таким как истирание, стирка, химическая эрозия и ультрафиолетовое облучение. Более того, несмотря на серьезные физические или химические

повреждения, модифицированная ткань может восстановить свои гидрофобные свойства. Эта уникальная способность к самовосстановлению может значительно продлить срок службы супергидрофобного полиэфинового волокна.

Авторами [32] показано, что обработка текстильных материалов наночастицами TiO_2 относительно проста, но недостаточная эффективность связывания между некоторыми волокнами и наночастицами TiO_2 создает проблему, касающуюся стабильности и долговечности нанокompозитных систем во время их эксплуатации. В этой статье рассматриваются некоторые последние достижения в отделке различных текстильных материалов наночастицами TiO_2 . На данный момент предлагается несколько химических и физико-химических методов функционализации волокон из полиамида и полиэтилентерефталата. Обработка тканей различными формами плазмы рассматривается как один из методов поверхностной модификации волокон, которая, однако, ограничивается тонким слоем на поверхности волокна, оставляя неизменными объемные свойства. Помимо химических изменений, плазменная обработка вызывает морфологические изменения, в результате чего повышается площадь поверхности и шероховатость.

В работе [33] изучено влияние диоксида титана на физико-механические свойства композита на основе джутового волокна и эпоксидной смолы. Установлено, что максимальное увеличение прочности на разрыв и изгиб составляет 30,79 и 38,44% для композита с наполнителем TiO_2 (2 мас. %) по сравнению с композитом без наполнителя при ориентации джутового тканого волокна под углом 90° .

Серия нанокompозитов ПЭТ/ TiO_2 была приготовлена методом полимеризации *in situ* [34]. Температура кристаллизации расплава росла с увеличением содержания TiO_2 . Значение температуры плавления, а также кристалличность сначала увеличиваются, а затем уменьшаются с постепенным добавлением TiO_2 . Скорость кристаллизации, а также кристалличность достигают максимума при использовании 1 мас. % TiO_2 . Изучение процесса изотермической кристаллизации как чистого ПЭТ, так и нанокompозитов ПЭТ/ TiO_2 показало, что добавление TiO_2 может значительно повысить скорость кристаллизации ПЭТ.

Авторами статьи [35] нанокompозиты ПЭТ с наночастицами TiO_2 и ZnO были получены методом литья. Термограммы ДСК показывают кристаллизацию нанокompозитов во время цикла охлаждения. При увеличении скорости охлаждения температура кристаллизации T_k смещается в сторону более низких температур. Для определения энергии активации кристаллизации

нанокompозитов ПЭТФ-TiO₂/ZnO была применена модель Киссинджера. Результаты показывают, что наночастицы ZnO являются более предпочтительным зародышеобразователем, чем наночастицы TiO₂ в матрице ПЭТ при отсутствии изотермической кристаллизации.

Современные исследования свидетельствуют о перспективности использования соединений металлов в качестве антибактериальных агентов. В настоящее время в условиях постоянного роста заболеваемости среди населения, вызванного высокой выживаемостью болезнетворных бактерий и вирусов, остро встает вопрос о снижении возможности заражения человека. Болезнетворные бактерии могут распространяться воздушно-капельным путем, а также через предметы общественного пользования (транспорт, общественные заведения, больницы). На многих поверхностях (поручни транспорта, столы и стулья в объектах питания, одежда и т. п.) возможно длительное сохранение бактериями своей жизнеспособности, что приводит к быстрому распространению инфекций. Поэтому исследования, направленные на разработку антимикробных и антибактериальных полимерных материалов, представляют большой интерес [36–38], особенно в медицинской и пищевой промышленности.

Различные металлические наночастицы и наночастицы оксидов металлов являются перспективными для новых противомикробных препаратов, так как они обладают широкой антимикробной активностью в отношении бактерий (как грамположительных, так и грамотрицательных), вирусов, грибков и простейших [39–40]. Механизмы действия антибактериальных металлических/металлоксидных наночастиц довольно разнообразны: повреждение клеточных мембран бактерий, дестабилизация бактериальной клеточной стенки и мембраны, а также гибель бактерий за счет выделения активных форм кислорода, вызывающих повреждение аминокислот, белков, липидов [40–44].

В работе [23] исследована антибактериальная активность тонкой пленки, полученной из смеси ПЭТ/ПБС в соотношении 90 : 10, содержащей TiO₂ или ZnO в количестве 1 и 2 мас. %. В работе рассмотрены два распространенных вида бактерий: *E. coli* (граммотрицательные) и *S. aureus* (грамположительные). В результате исследований установлено, что при взаимодействии материалов с бактериями выделяются активные формы кислорода в присутствии как TiO₂, так и ZnO. Такие формы кислорода могут выделяться с поверхности ZnO при активации как УФ, так и видимым светом, и вызывать гибель микроорганизмов. Могут образовываться электронно-дырочные пары, которые могут привести к образованию ионов OH⁻ и H⁺ из молекул воды.

Молекулы растворенного кислорода превращаются в анион-радикалы супероксида (⁻O₂⁻), которые могут реагировать с H⁺ с образованием радикалов (HO₂⁻). Тогда при последующем столкновении с электронами будут генерироваться анионы перекиси водорода (HO₂⁻) и в присутствии ионов водорода превращаться в молекулы H₂O₂. В дальнейшем такое сильнодействующее химическое вещество, как перекись водорода (H₂O₂), может мигрировать через клеточную мембрану, вызывая гибель бактерий.

Одними из наиболее распространенных антимикробных добавок являются соединения серебра [45–48]. Так, в статье [49] Ронг Лином и соавторами были исследованы антибактериальные свойства ПЭТ волокон. Четвертичное аммонийное соединение 2-диметил-2-гексадецил-1-метакрилоксиэтиламмония бромид был синтезирован и привит на полиэфирные (ПЭТ) волокна акриловой кислотой методом электронно-лучевого облучения. Привитые волокна пропитывали раствором AgNO₃ для дальнейшего повышения антибактериальной эффективности. Тестирование антибактериальной эффективности показало, что привитые образцы ПЭТ инактивировали весь золотистый стафилококк (*S. aureus*) и кишечную палочку (*E. coli*) за 10 мин. После покрытия ионами серебра антибактериальная эффективность привитого ПЭТ с серебром против *S. aureus* значительно улучшилась.

Придание материалам антибактериальных свойств приобретает особо важное значение для изготовления изделий медицинского назначения. Авторами [50] разработан метод модификации наночастицами серебра с применением обработки ультразвуком. Полученные материалы используются для изготовления медицинских масок. Модификация осуществляется путем помещения текстильного материала в раствор нитрата серебра в смеси вода/этиленгликоль с добавлением гидроксида аммония, после чего материал подвергается ультразвуковому воздействию. Этиленгликоль не восстанавливает серебро до металла, так как образуется устойчивый комплекс [Ag(NH₃)₂]⁺, концентрация ионов Ag⁺ падает, и реакция восстановления протекает очень медленно. Именно в таких условиях происходит образование наноразмерных частиц серебра, размер которых в среднем составляет около 80 нм. При ультразвуковой обработке достигаются достаточные температуры, чтобы происходили плавление и карбонизация волокон ткани в местах контактов с наночастицами серебра, и частицы за счет физической адсорбции удерживаются на поверхности материала. Полученные данным методом текстильные материалы обладают прекрасной антибактериальной активностью, процесс нанесения наночастиц на

поверхность материала проходит в одну стадию и не требует использования токсичных реактивов. Значительным недостатком данного метода модификации является приобретение текстильным материалом выраженного серого цвета, что ограничивает применение данной технологии для производства антибактериальных текстильных материалов светлых оттенков.

Авторами [51] изучена проблема увеличения сроков хранения пищевых продуктов, а именно исследована возможность применения полимерных материалов, содержащих на поверхности наночастицы серебра для создания упаковки с антимикробными свойствами. Проводили исследование модифицированных полиэтиленовых (ПЭ) и полипропиленовых (ПП) пленок на способность проявлять фунгицидную активность по отношению к плесневым грибам рода *Penicillium spp.* и антибактериальную активность в отношении спорообразующих бактерий *Bacillus subtilis*. Для придания исследуемым упаковочным полимерным материалам антимикробных свойств на их поверхность путем распыления наносили растворы наночастиц серебра. Нанесение модифицирующих растворов производили на предварительно обработанные поверхности ПП и ПЭ пленок 3%-ным раствором перекиси водорода и на необработанные ПП и ПЭ пленки. Контрольными образцами являлись исследуемые ПП и ПЭ пленки без нанесения наночастиц. В качестве модифицирующего антимикробного агента использовали коллоидные растворы наноразмерных частиц серебра «Аргитос» («Синтек Нано», РФ) и «Агбион-1» (концерн «Наноиндустрия», РФ). Установлено, что полимерные пленки на основе полиолефинов, обработанные коллоидным раствором наночастиц серебра «Аргитос», обладают только антибактериальными свойствами, в отличие от пленок, обработанных раствором «Агбион-1», проявляющих как фунгицидную, так и антибактериальную активность. Принципиальным отличием исследуемых коллоидных растворов является тип применяемого стабилизатора. В коллоидном растворе «Аргитос» в качестве стабилизатора используется пропиленгликоль, а в растворе «Агбион 1» – поверхностно-активное вещество (ПАВ). В связи с предполагаемым синергетическим эффектом наночастиц серебра и ПАВ раствор «Агбион 1» обладает лучшими антибактериальными и фунгицидными свойствами по сравнению с раствором «Аргитос» при одинаковом содержании наночастиц серебра в растворе. Также показано, что упаковочные материалы с наночастицами серебра, нанесенными без предварительной обработки поверхности полимерного материала перекисью водорода, проявляли лучшие антимикробные свойства, чем предварительно обработанная пленка.

Применение модифицированных пленок увеличивает срок годности упакованной в нее продукции.

В патенте [52] рассматривается способ получения полимерных изделий на основе ПЭТ с антибактериальными свойствами, которые используются в текстильной промышленности, медицине и изделиях специального назначения. Описывается способ получения изделий из ПЭТ путем вытяжки изделия вытянутой формы в адсорбционно-активной жидкой среде, содержащей растворенную соль серебра, и сушки изделия в изометрических условиях с последующей термообработкой изделия при 50°C и выше в течение не менее 5 с. В качестве полимерного изделия вытянутой формы можно использовать пленку, волокно, трубку, стержень, ленту. Предложенный способ позволяет упростить технологию получения полиэтилентерефталатных изделий и повысить их антибактериальные свойства по сравнению с известными.

Также способностью проявлять бактериостатические и бактерицидные свойства характеризуется оксид цинка. Включение частиц ZnO в пряжу придает ей антибактериальные свойства. Исследования [53] показали, что контрольный образец ткани проявляет слабую противомикробную активность, а у модифицированной ПЭТ ткани противомикробная активность увеличивается, что указывает на сильное бактериостатическое свойство ткани, на поверхности которой предотвращается рост бактериальных колоний. Бактерицидная активность (*L*) ПЭТ ткани намного выше (2,33, 2,23) по сравнению с контрольной тканью (0,74, 0,86). Поэтому, когда бактерии вступают в контакт с тканью, их гибель наступает в результате взаимодействия с ZnO, присутствующим на поверхности пряжи. Это бактериостатическое и бактерицидное свойство ткани оказывает влияние на снижение запаха пота. Обычно пот как таковой не имеет никакого запаха. Разложение под действием бактерий жирных кислот и липидов, присутствующих в поте, приводит к образованию молекул, вызывающих неприятный запах. Если предотвратить рост бактерий, можно предотвратить появление запаха пота. Чтобы увидеть влияние ZnO на запах, вызванный потом, из ткани были изготовлены рубашки, которые добровольцы оценили на предмет запаха. Рубашки из многофункциональной ПЭТ ткани, содержащие ZnO, показали значительное подавление запаха пота.

Антибактериальные свойства наночастиц оксида цинка были исследованы Р. Коодали и соавторами в статье [54] с использованием как грамположительных, так и грамотрицательных микроорганизмов. Эти исследования демонстрируют, что наночастицы ZnO обладают широким спектром антибактериальной активности по отношению к различным микроорганизмам, которые обычно

встречаются в окружающей среде. Предполагается, что антибактериальная активность наночастиц ZnO может включать как выработку активных форм кислорода, так и накопление наночастиц в цитоплазме или на внешних мембранах бактерий. В целом экспериментальные результаты свидетельствуют о том, что наночастицы ZnO могут быть использованы в качестве антибактериальных средств против широкого спектра микроорганизмов для контроля и предотвращения распространения и персистенции бактериальных инфекций. Также установлено [55], что частицы ZnO проявляют эффективную антибактериальную активность как против грамположительных, так и против грамотрицательных бактерий не только для полимерных материалов, но и на хлопчатобумажной ткани, что свидетельствует об универсальности их применения. Разработанный в статье способ нанесения биополиаминовых покрытий обеспечивает не только простой синтез покрытия на гибкой подложке, но и изготовление материалов с антибактериальными свойствами для применения в здравоохранении.

Заключение. Представленный обзор свидетельствует о многостороннем положительном

влиянии наноксидов металлов на свойства полимеров. Это проявляется в значительном улучшении физико-механических и антибактериальных свойств, а также в появлении фотокаталитической активности. Данные эффекты позволяют значительно расширить области применения нанодобавок при создании различных тканей и волокон для медицинской промышленности, обладающих бактериостатическими свойствами. Возможно создание специальных гидрофобных и самоочищающихся покрытий. Модифицированные полимерные материалы используются для получения фильтрующих систем при водочистке. Одним из важнейших свойств является повышение устойчивости к горению, что позволяет использовать их для специального применения. Также необходимо отметить защитное действие от ультрафиолетового излучения для повышения электропроводности и термической стабильности полимеров. Таким образом, наночастицы металлов и их производных находят широкое применение при создании полимерных материалов и являются перспективными во многих отраслях промышленности и медицины.

Список литературы

1. Елисеев А. А., Лукашин А. В. Функциональные наноматериалы / под ред. Ю. Д. Третьякова. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 456 с.
2. Михайлов М. Д. Современные проблемы материаловедения. Нанокompозитные материалы: учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. 208 с.
3. Липин В. А. Нанотехнологии в химической технологии производства полимеров: учеб. пособие. СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2020. 72 с.
4. Полимерные нанокомпозиты / под ред. М. Ю-Винг, Ю. Жонг-Жен. М.: Техносфера, 2011. 687 с.
5. Оптические полимерные нанокомпозиты / Ю. Э. Бурункова [и др.]. СПб.: Университет ИТМО, 2017. 80 с.
6. Функциональные наполнители для пластмасс / под ред. М. Ксантоса; пер. с англ. под ред. В. Н. Кулезнева. СПб.: Научные основы и технологии, 2010. 462 с.
7. Перепелкин К. Е. Армирующие волокна и волокнистые полимерные композиты. СПб.: Научные основы и технологии, 2009. 380 с.
8. Фостер Л. Нанотехнологии, наука, инновации и возможности. М.: Техносфера, 2008. 352 с.
9. Кобаяси Н. Введение в нанотехнологию. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2007. 134 с.
10. Сергеев Г. Б. Нанохимия. М.: МГУ, 2007. 148 с.
11. Данилов А. Дуализм наночастиц // Российские нанотехнологии. 2009. Т. 41, № 5. С. 20–21.
12. Шуленбург М. Нанотехнологии – новинки завтрашнего дня. Люксембург: Служба по официальным изданиям Европейского Сообщества, 2006. 56 с.
13. Пинчук Л. С., Гольдаде В. А. Крейзинг в технологии полиэфирных волокон. Минск: Беларуская навука, 2014. 177 с.
14. Рева О. В., Назарович А. Н., Богданова В. В. Закрепление нетоксичных антипиренов на поверхности полиэфирных волокон // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. 2019. Т. 3, № 2. С. 107–116.
15. Supercritical fluid flame-retardant processing of polyethylene terephthalate (PET) fiber treated with 9,10-dihydro-9-oxa-10-phosphaphenanthrene-10-oxide (DOPO): Changes in physical properties and flame-retardant performance / O. Jiyeon [et al.] // Journal of CO₂ Utilization. 2021. Vol. 54. 14 p. DOI: 10.1016/j.jcou.2021.101761.
16. Construction of catalyst-free, smoke suppression flame retardant PET fiber via bifunctional metal-organic framework / A. Zhang [et al.] // Polymer Degradation and Stability. 2023. Vol. 216. 10 p. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2023.110457.
17. PET fabric treated with environmental-friendly phosphorus-based compounds for enhanced flame retardancy, thermal stability and anti-dripping performance / D. Fang [et al.] // Composites Part B: Engineering. 2022. Vol. 235. 12 p. DOI: 10.1016/j.compositesb.2022.109791.

18. Flame-retardant and anti-dripping coating for PET fabric with hydroxyl-containing cyclic phosphoramidate / Ch. Zhang [et al.] // *Polymer Degradation and Stability*. 2021. Vol. 192. 18 p. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2021.109699.

19. Упрочнение ПЭТФ нитей многостенными углеродными нанотрубками / Н. Р. Прокопчук [и др.] // *Полимерные материалы и технологии*. 2020. Т. 6, № 4. С. 30–36. DOI: 10.32864/polymmattech-2020-6-4-30-36.

20. Серцова А. А., Юртов Е. В. Наночастицы соединений металлов – замедлители горения для полимерных композиционных материалов // *Получение и модифицирование синтетических волокон и нитей для инновационных материалов, композитов и изделий: тез. докл. Всеросс. науч.-практ. конф., г. Плес Ивановской обл., 2–5 сент. 2015 г., Иваново, 2015*. С. 21.

21. Rashid M. M., Simončič B., Tomšič B. Recent advances in TiO₂-functionalized textile surfaces // *Surface and Interfaces*. 2021. Vol. 22. P. 1–71. DOI: 10.1016/j.surfin.2020.100890.

22. Carosio F., Alongi J., Frache A. Influence of surface activation by plasma and nanoparticle adsorption on the morphology, thermal stability and combustion behavior of PET fabrics // *European Polymer Journal*. 2011. Vol. 47, no. 5. P. 893–902. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2011.01.009.

23. Effect of TiO₂ and ZnO on thin film properties of PET/PBS blend for food packaging applications // P. Threeropnatkula [et al.] // *Energy Procedia*. 2014. Vol. 56. P. 102–111. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.07.137.

24. Bouhriss A., Gmouth S. The recent advances in nanotechnologies for textile functionalization // *Advances in Functional and Protective Textiles*. 2020. P. 531–568. DOI: 10.1016/B978-0-12-820257-9.00020-5.

25. Manumur R. M., Simoncic B., Tomcsic B. Recent advances in TiO₂-functionalized textile surfaces // *Surfaces and Interfaces*. 2021. Vol. 22. P. 1–71. DOI: 10.1016/j.surfin.2020.100890.

26. Замедление горения и упрочнение ПЭТ частицами диоксида титана / Н. Р. Прокопчук [и др.] // *Полимерные материалы и технологии*. 2022. Т. 8, № 4. С. 63–68.

27. Residue-based TiO₂/PET photocatalytic films for the degradation of textile dyes: a step in the development of green monolith reactors / L. N. Ribeiroa [et al.] // *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*. 2020. Vol. 147. P. 1–33. DOI: 10.1016/j.ccep.2019.1077921.

28. Novel and versatile TiO₂ thin films on PET for photocatalytic removal of contaminants of emerging concern from water / B. P. Rafaela [et al.] // *Chemical Engineering Journal*. 2019. Vol. 370. P. 1251–1261. DOI: 10.1016/j.cej.2019.03.284.

29. Porphyrin Dye/TiO₂ imbedded PET to improve visible-light photocatalytic activity and organosilicon attachment to enrich hydrophobicity to attain an efficient self-cleaning material / Kyeong Su Min [et al.] // *Dyes and Pigments*. 2019. Vol. 162. P. 8–17. DOI: 10.1016/j.dyepig.2018.10.014.

30. Influence of TiO₂ nanoparticles on formation mechanism of PANI/TiO₂ nano-composite coating on PET fabric and its structural and electrical properties / M. B. Radoičića [et al.] // *Surface and Coatings Technology*. 2015. Vol. 278. P. 38–47. DOI: 10.1016/j.surcoat.2015.07.070.

31. Fabrication of robust and self-healing superhydrophobic PET fabrics based on profiled fiber structure // F. Zhoua [et al.] // *Colloids and Surfaces*. 2021. Vol. 609. 12 p. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2020.125686.

32. Radetic M. Functionalization of textile materials with TiO₂ nanoparticles // *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*. 2013. Vol. 16. P. 62–76. DOI: 10.1016/j.jphotochemrev.2013.04.002.

33. Bhargav M., Suresh B. V. Experimental investigation of fiber orientation effect on mechanical and erosive wear performance of TiO₂ filled woven jute fiber based epoxy composites // *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 44, part 1. P. 2617–2622. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.12.660.

34. Crystallization characteristics of PET/TiO₂ nanocomposites / T. Yamada [et al.] // *Materials Science: an Indian Journal*. 2006. Vol. 2, no. 6. P. 154–160.

35. Crystallization activation energy of polyethylene terephthalate & its ZnO/TiO₂ nanocomposites / H. Agrawal [et al.] // *Research and Reviews: Journal of Pure and Applied Physics*. 2014. Vol. 2, no. 1. P. 17–21.

36. Catheters coated with Zn-doped CuO nanoparticles delay the onset of catheter-associated urinary tract infections / Y. Shalom [et al.] // *Nano Research*. 2016. Vol. 10. P. 520–533. DOI: 10.1007/s12274-016-1310-8.

37. Exploring the potential of polyethylene terephthalate in the design of antibacterial surface / T. Çaykara [et al.] // *Medical Microbiology and Immunology*. 2020. Vol. 209. P. 363–372. DOI: 10.1007/s00430-020-00660-8.

38. Fabrication of multifunctional PET fabrics with flame retardant, antibacterial and superhydrophobic properties / L. Qiuyin [et al.] // *Progress in Organic Coatings*. 2021. Vol. 157. P. 296–305. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2021.106296.

39. Антибактериальные неорганические агенты: эффективность использования многокомпонентных систем / А. А. Мелешко [и др.] // *Инфекция и иммунитет*. 2020. Т. 10, № 4. С. 639–654.

40. Abo-Zeid Y., Williams G. R. The potential anti-infective applications of metaloxide nanoparticles: a systematic review // *Wiley Interdisciplinary Reviews Nanomedicine and Nanobiotechnology*. 2020. Vol. 12, no. 3. P. 1–36. DOI: 10.1002/wnan.1592.
41. Alavi M., Rai M. Recent advances in antibacterial applications of metal nanoparticles (MNPs) and metal nanocomposites (MNCs) against multidrug resistant (MDR) bacteria // *Expert Review of Anti-infective Therapy*. 2019. Vol. 17, no. 6. P. 419–428. DOI: 10.1080/14787210.2019.1614914.
42. A review on bidirectional analogies between the photocatalysis and antibacterial properties of ZnO / J. Liu [et al.] // *Journal of Alloys and Compounds*. 2019. Vol. 783. P. 898–918. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.12.330.
43. Rauhunath A., Perumal E. Metal oxide nanoparticles as antimicrobial agents: a promise for the future // *International Journal of Antimicrobial Agents*. 2017. Vol. 49, no. 2. P. 137–152. DOI: 10.1016/j.ijantimicag.2016.11.011.
44. Metal-based nanoparticles as antimicrobial agents: an overview / E. Sanchez-Lopez [et al.] // *Nanomaterials*. 2020. Vol. 10, no. 2. P. 292–331. DOI: 10.3390/nano10020292.
45. Калмурзаева А. Ш., Джуманазарова А. З., Сариева Ж. К. Антимикробные свойства против патогенных и условно-патогенных микроорганизмов наночастиц серебра, полученных из экстрактов растений // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2022. № 6. С. 81–86.
46. Preparation and characterizations of antibacterial PET-based hollow fibers containing silver particles / L. Lin [et al.] // *Materials Letters*. 2011. Vol. 65. P. 1375–1377. DOI: 10.1016/j.matlet.2011.02.006.
47. Recent advances in the development of metal complexes as antibacterial agents with metal-specific modes of action / J. E. Waters [et al.] // *Current Opinion in Microbiology*. 2023. Vol. 75. P. 1–11. DOI: 10.1016/j.mib.2023.102347.
48. Photoreactive silver-containing supramolecular polymers that form self-assembled nanogels for efficient antibacterial treatment / Y. Asmare Fesseha [et al.] // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2024. Vol. 654, part B. P. 967–978. DOI: 10.1016/j.jcis.2023.10.119.
49. Antibacterial modification of PET with quaternary ammonium salt and silver particles via electron-beam irradiation / Shumin Zhang [et al.] // *Materials Science and Engineering*. 2017. Vol. 85. P. 123–129. DOI: 10.1016/j.msec.2017.12.010.
50. Способ изготовления медицинской маски: пат. 2426484 РФ / В. М. Жариков, Д. Г. Шарапов. Оpubл. 20.08.2011.
51. Создание упаковочных полимерных материалов с антимикробными свойствами / Ю. В. Фролова [и др.] // *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2017. Т. 7, № 3. С. 145–152.
52. Способ получения полимерных изделий на основе полиэтилентерефталата с антибактериальными свойствами: пат. RU 2394948 / В. О. Шеляков, М. Н. Иванов, А. Л. Волынский, Н. Ф. Бакеев, Л. М. Ярышева, О. В. Аржакова, А. А. Долгова, Е. В. Семенова, Н. И. Никонорова. Оpubл. 20.07.2010.
53. Urasani P. S., Sreekumar T. V., Jain A. K. Polyester fabric with inherent antibacterial, hydrophilic and UV protection properties // *The Journal of The Textile Institute*. 2016. Vol. 107. P. 1135–1143. DOI: 10.1080/00405000.2015.1097082.
54. Raghupathi K. R., Koodali R. T., Manna A. C. Size-dependent bacterial growth inhibition and mechanism of antibacterial activity of zinc oxide nanoparticles // *Langmuir*. 2011. Vol. 27, no. 7. P. 4020–4028. DOI: 10.1021/la104825u.
55. Enabling antibacterial coating via bioinspired mineralization of nanostructured ZnO on fabrics under mild conditions / J. Manna [et al.] // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2013. Vol. 5, no. 10. P. 4457–4463. DOI: 10.1021/am400933n.

References

1. Eliseev A. A., Lukashin A. V. *Funktsional'nyye nanomaterialy* [Functional nanomaterials]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2010. 456 p. (In Russian).
2. Mikhaylov M. D. *Sovremennyye problemy materialovedeniya. Nanokompozitnye materialy* [Modern problems of materials science. Nanocomposite materials]. St. Petersburg, Izdatel'stvo Politekhnikeskogo universiteta Publ., 2010. 208 p. (In Russian).
3. Lipin V. A. *Nanotekhnologii v khimicheskoy tekhnologii proizvodstva polimerov* [Nanotechnologies in chemical technology for polymer production]. St. Petersburg, VShTE SPbGUPTD Publ., 2020. 72 p. (In Russian).
4. *Polimernyye nanokompozity* [Polymer nanocomposites]. Ed. by May Yu-Ving, Yu Zhong-Zhen. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2011. 687 p (In Russian).
5. Burunkova Yu. E., Denisyuk I. Yu., Shekhanova E. B., Fokina M. I. *Opticheskiye polimernyye nanokompozity* [Optical polymer nanocomposites]. St. Petersburg, Universitet ITMO Publ., 2017. 80 p. (In Russian).

6. *Funktsional'nyye napolniteli dlya plastmass* [Functional fillers for plastics]. Ed. by M. Ksantos. St. Petersburg, Nauchnyye osnovy i tekhnologii Publ., 2010. 462 p. (In Russian).
7. Perepelkin K. E. *Armiryushchiye volokna i voloknistyye polimernyye kompozity* [Reinforcing fibers and fibrous polymer composites]. St. Petersburg, Nauchnyye osnovy i tekhnologii Publ., 2009. 380 p. (In Russian).
8. Foster L. *Nanotekhnologii, nauka, innovatsii i vozmozhnosti* [Nanotechnology, science, innovation and opportunity]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2008. 352 p. (In Russian).
9. Kobayasi N. *Vvedeniye v nanotekhnologiyu* [Introduction to nanotechnology]. Moscow, Binom. Laboratoriya znaniy Publ., 2007. 134 p. (In Russian).
10. Sergeev G. B. *Nanokhimiya* [Nanotechnology]. Moscow, MGU Publ., 2007. 148 p. (In Russian).
11. Danilov A. Nanoparticle dualism. *Rossiyskiye nanotekhnologii* [Russian nanotechnology], 2009, vol. 41, no. 5, pp. 20–21 (In Russian).
12. Shulenburg M. *Nanotekhnologii – novinki zavtrashnego dnya* [Nanotechnology – the new products of tomorrow]. Luxembourg, Publications Service of the European Community Publ., 2006. 56 p. (In Russian).
13. Pinchuk L. S., Gol'dade V. A. *Kreyzing v tekhnologii poliefirnykh volokon* [Crazing in polyester fiber technology]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2014. 177 p. (In Russian).
14. Reva O. V., Nazarovich A. N., Bogdanova V. V. Fixing non-toxic fire retardants on the surface of polyester fibers. *Vestnik Universiteta grazhdanskoy zashchity MChS Belarusi* [Bulletin of the University of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of Belarus], 2019, vol. 3, no. 2, pp. 107–116 (In Russian).
15. Jiyeon O., Sam Soo K., Jaewoong L., Chankyu K. Supercritical fluid flame-retardant processing of polyethylene terephthalate (PET) fiber treated with 9,10-dihydro-9-oxa-10-phosphaphenanthrene-10-oxide (DOPO): Changes in physical properties and flame-retardant performance. *Journal of CO₂ Utilization*, 2021, vol. 54, 14 p. DOI: 10.1016/j.jcou.2021.101761.
16. Zhang A., Rui W., Yuping W., Zhenfeng D., Jing Zh., Jianfei W. Construction of catalyst-free, smoke suppression flame retardant PET fiber via bifunctional metal-organic framework. *Polymer Degradation and Stability*, 2023, vol. 216, 10 p. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2023.110457.
17. Fang D., Shumin Zh., Xiaoyan Ch., Rong L., Xuehong R. PET fabric treated with environmental-friendly phosphorus-based compounds for enhanced flame retardancy, thermal stability and anti-dripping performance. *Composites Part B: Engineering*, 2022, vol. 235, 12 p. DOI: 10.1016/j.compositesb.2022.109791.
18. Chenxi Zh., Chao Zh., Jiewen H., Zhiming J., Ping Zh. Flame-retardant and anti-dripping coating for PET fabric with hydroxyl-containing cyclic phosphoramidate. *Polymer Degradation and Stability*, 2021, vol. 192, 18 p. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2021.109699.
19. Prokopchuk N. R., Lyubimov A. G., Vishnevskaya T. A., Mozheyko Yu. M., Krauklis A. V. Strengthening PET threads with multi-walled carbon nanotubes. *Polimernyye materialy i tekhnologii* [Polymer materials and technologies], 2020, vol. 6, no. 4, pp. 30–36 (In Russian). DOI: 10.32864/polymmattech-2020-6-4-30-36.
20. Sertsova A. A., Yurtov E. V. Nanoparticles of metal compounds – flame retardants for polymer composite materials. *Polucheniyе i modifitsirovaniye sinteticheskikh volokon i nitey dlya innovatsionnykh materialov, kompozitov i izdeliy: tezisy dokladov Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Production and modification of synthetic fibers and threads for innovative materials, composites and products: abstracts of the All-Russian scientific and practical conference]. Ivanovo, 2015, p. 21 (In Russian).
21. Rashid M. M., Simoncic B., Tomsic B. Recent advances in TiO₂-functionalized textile surfaces. *Surface and Interfaces*, 2021, vol. 22, pp. 1–71. DOI: 10.1016/j.surfin.2020.100890.
22. Carosio F., Alongi J., Frache A. Influence of surface activation by plasma and nanoparticle adsorption on the morphology, thermal stability and combustion behavior of PET fabrics. *European Polymer Journal*, 2011, vol. 47, no. 5, pp. 893–902. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2011.01.009.
23. Poonsub T., Chanikarn W., Wirawan I., Sunantha S., Chanin K. Effect of TiO₂ and ZnO on thin film properties of PET/PBS blend for food packaging applications. *Energy Procedia*, 2014, vol. 56, pp. 102–111. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.07.137.
24. Bouhriss A., Gmouth S. The recent advances in nanotechnologies for textile functionalization. *Advances in Functional and Protective Textiles*, 2020, pp. 531–568. DOI: 10.1016/B978-0-12-820257-9.00020-5.
25. Manumur R. M., Simoncic B., Tomcsic B. Recent advances in TiO₂-functionalized textile surfaces. *Surfaces and Interfaces*, 2021, vol. 22, pp. 1–71. DOI: 10.1016/j.surfin.2020.100890.
26. Prokopchuk N. R., Lenartovich L. A., Vishnevskaya T. A., Mozheyko Yu. M. Retardation of combustion and strengthening of PET with titanium dioxide particles. *Polimernyye materialy i tekhnologii* [Polymer materials and technologies], 2022, vol. 8, no. 4, pp. 63–68 (In Russian).
27. Ribeiro N. L., Fronseca A., Da Silva E., Oliveira E., Ribeiro A., Maranhao L., Pacheco J., Almeida L. Residue-based TiO₂/PET photocatalytic films for the degradation of textile dyes: a step in the development of green monolith reactors. Author links open overlay panel. *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*, 2020, vol. 147, pp. 1–33. DOI: 10.1016/j.cep.2019.1077921.

28. Marcelino R., Amorima C., Ratova M., Delfour-Peyrethon B., Kelly P. Novel and versatile TiO₂ thin films on PET for photocatalytic removal of contaminants of emerging concern from water. *Chemical Engineering Journal*, 2019, vol. 370, pp. 1251–1261. DOI: 10.1016/j.cej.2019.03.284.
29. Min K. S., Manivannan R., Son Y. Porphyrin Dye/TiO₂ imbedded PET to improve visible-light photocatalytic activity and organosilicon attachment to enrich hydrophobicity to attain an efficient self-cleaning material. *Dyes and Pigments*, 2019, vol. 162, pp. 8–17. DOI: 10.1016/j.dyepig.2018.10.014.
30. Radoicic M. B., Milosevic M. V., Milicevic D. S., Suljovruji E. H. Influence of TiO₂ nanoparticles on formation mechanism of PANI/TiO₂ nano-composite coating on PET fabric and its structural and electrical properties. *Surface and Coatings Technology*, 2015, vol. 278, pp. 38–47. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2015.07.070.
31. Zhoua F., Zhanga Y., Zhanga D., Zhangc Z., Fua F., Zhanga X., Yangb Y., Lina H., Chen Y. Fabrication of robust and self-healing superhydrophobic PET fabrics based on profiled fiber structure. *Colloids and Surfaces*, 2021, vol. 609, 12 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.125686>.
32. Radetic M. Functionalization of textile materials with TiO₂ nanoparticles. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 2013, vol. 16, pp. 62–76. DOI: 10.1016/j.jphotochemrev.2013.04.002.
33. Bhargav M., Suresh B. V. Experimental investigation of fiber orientation effect on mechanical and erosive wear performance of TiO₂ filled woven jute fiber based epoxy composites. *Materials Today: Proceedings*, 2021, part 1, vol. 44, pp. 2617–2622. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.12.660.
34. Yamada T., Hao L., Tada K., Konagaya Sh., Li G. Crystallization characteristics of PET/TiO₂ nanocomposites. *Materials Science: an Indian Journal*, 2006, vol. 2, no. 6, pp. 154–160.
35. Agrawala H., Awasthi K., Saraswata V. Crystallization activation energy of polyethylene terephthalate & its ZnO/TiO₂ nanocomposites. *Research and Reviews: Journal of Pure and Applied Physics*, 2014, vol. 2, no. 1, pp. 17–21.
36. Shalom Y., Perelshtein I., Perkas N., Gedanken A., Banin E. Catheters coated with Zn-doped CuO nanoparticles delay the onset of catheter-associated urinary tract infections. *Nano Research*, 2016, vol. 10, pp. 520–533. DOI: 10.1007/s12274-016-1310-8.
37. Çaykara T., Sande M. G., Azoia N., Rodrigues L. R., Silva C. J. Exploring the potential of polyethylene terephthalate in the design of antibacterial surface. *Medical Microbiology and Immunology*, 2020, vol. 209, pp. 363–372. DOI: 10.1007/s00430-020-00660-8.
38. Li Q., Zhang Sh., Mahmood K., Jin Yi, Huang Ch., Huang Z., Zhang S., Ming W. Fabrication of multifunctional PET fabrics with flame retardant, antibacterial and superhydrophobic properties. *Progress in Organic Coatings*, 2021, vol. 157, pp. 296–305. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2021.106296.
39. Meleshko A. A., Afinogenova A. G., Afinogenov G. E., Spiridonova A. A., Tolstoy V. P. Antibacterial inorganic agents: the effectiveness of using multi-component systems. *Infektsiya i immunitet* [Infection and immunity], 2020, vol. 10, no. 4, pp. 639–654 (In Russian).
40. Abo-Zeid Y., Williams G. R. The potential anti-infective applications of metaloxide nanoparticles: a systematic review. *Wiley Interdisciplinary Reviews Nanomedicine and Nanobiotechnology*, 2020, vol. 12, no. 3, pp. 1–36. DOI: 10.1002/wnan.1592.
41. Alavi M., Rai M. Recent advances in antibacterial applications of metal nanoparticles (MNPs) and metal nanocomposites (MNCs) against multidrug resistant (MDR) bacteria. *Expert Review of Anti-infective Therapy*, 2019, vol. 17, no. 6, pp. 419–428. DOI: 10.1080/14787210.2019.1614914.
42. Liu J., Wang Y., Peng Y., Wang A. A review on bidirectional analogies between the photocatalysis and antibacterial properties of ZnO. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, vol. 783, pp. 898–918. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.12.330.
43. Rauhunath A., Perumal E. Metal oxide nanoparticles as antimicrobial agents: a promise for the future. *International Journal of Antimicrobial Agents*, 2017, vol. 49, no. 2, pp. 137–152. DOI: 10.1016/j.ijantimicag.2016.11.011.
44. Sanchez-Lopez E., Gomes D., Esteruelas G., Bonilla L., Lopez-Machado A. L., Galindo R., Cano A., Espina M., Etcheto M. Metal-based nanoparticles as antimicrobial agents: an overview. *Nanomaterials*, 2020, vol. 10, no. 2, pp. 292–331. DOI: 10.3390/nano10020292.
45. Kalmurzaeva A. Sh., Dzhumanazarova A. Z., Sarieva Zh. K. Antimicrobial properties of silver nanoparticles obtained from plant extracts against pathogenic and opportunistic microorganisms. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy* [International journal of applied and fundamental research], 2022, no. 6, pp. 81–86 (In Russian).
46. Lin L., Wenzhong G., Wang X., Li X., Wang S. Preparation and characterizations of antibacterial PET-based hollow fibers containing silver particles. *Materials Letters*, 2011, vol. 65, pp. 1375–1377. DOI: 10.1016/j.matlet.2011.02.006.
47. Waters J. E., Stevens-Cullinane L., Siebenmann L., Hess J. Recent advances in the development of metal complexes as antibacterial agents with metal-specific modes of action. *Current Opinion in Microbiology*, 2023, vol. 75, pp. 1–11. DOI: 10.1016/j.mib.2023.102347.

48. Fesseha Y. A., Manayia A. H., Liu P., Su T., Huang S. Photoreactive silver-containing supramolecular polymers that form self-assembled nanogels for efficient antibacterial treatment. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2024, part B, vol. 654, pp. 967–978. DOI: 10.1016/j.jcis.2023.10.119.

49. Zhang Sh., Li R., Huang D., Ren X., Huang T. Antibacterial modification of PET with quaternary ammonium salt and silver particles via electron-beam irradiation. *Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 85, pp. 123–129. DOI: 10.1016/j.msec.2017.12.010.

50. Zharikov V. M., Sharapov D. G. The method for making a medical mask. Patent RU 2426484 RF, 2011 (In Russian).

51. Frolova Yu. V., Kirsh I. A., Beznaeva O. V., Pomogova D. A., Tikhomirov A. A. Creation of packaging polymer materials with antimicrobial properties. *Izvestiya vuzov. Prikladnaya khimiya i biotekhnologiya* [News from universities. Applied chemistry and biotechnology], 2017, vol. 7, no. 3, pp. 145–152 (In Russian).

52. Shelyakov V. O., Ivanov M. N., Volynskiy A. L., Bakeev N. F., Yarysheva L. M., Arzhakova O. V., Dolgova A. A., Semenova E. V., Nikonorova N. I. The method for producing polymer products based on polyethylene terephthalate with antibacterial properties. Patent RU 2394948, 2010 (In Russian).

53. Upasani P. S., Sreekumar T. V., Jain A. K. Polyester fabric with inherent antibacterial, hydrophilic and UV protection properties. *The Journal of The Textile Institute*, 2016, vol. 107, pp. 1135–1143. DOI: 10.1080/00405000.2015.1097082.

54. Raghupathi K. R., Koodali R. T., Manna A. C. Size-dependent bacterial growth inhibition and mechanism of antibacterial activity of zinc oxide nanoparticles. *Langmuir*, 2011, vol. 27, no. 7, pp. 4020–4028. DOI: 10.1021/la104825u.

55. Manna J., Begum G., Kumar K., Misra S., Rana R. Enabling antibacterial coating via bioinspired mineralization of nanostructured ZnO on fabrics under mild conditions. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2013, vol. 5, no. 10, pp. 4457–4463. DOI: 10.1021/am400933n.

Информация об авторах

Ленартович Лилия Алексеевна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: lenartovich@belstu.by

Прокопчук Николай Романович – член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор химических наук, профессор, профессор кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: nrprok@gmail.com

Касперович Ольга Михайловна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: kasperovichvolha@yandex.by

Петрушеня Александр Федорович – кандидат технических наук, доцент кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: petraf@belstu.by

Любимов Александр Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: lubimov@belstu.by

Information about the authors

Lenartovich Liliya Alekseevna – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lenartovich@belstu.by

Prokopchuk Nikolay Romanovich – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, DSc (Chemistry), Professor, Professor, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nrprok@gmail.com

Kasperovich Volha Michailovna – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kasperovichvolha@yandex.by

Petrushenya Aleksandr Fedorovich – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: petraf@belstu.by

Liubimau Aleksandr Gennadievich – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lubimov@belstu.by

Поступила 05.09.2024