УДК 667.6

Е. Н. Сабадаха[1], И. К. Божелко[1], А. М. Тригубович[2], Е. А. Степаньков[1]
Белорусский государственный технологический университет[1]
Институт микробиологии НАН Беларуси[2]

СИНЕРГЕТИЧЕСКОЕ УСИЛЕНИЕ ОГНЕБИОЗАЩИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОДНО-ДИСПЕРСИОННОГО ЛАКОКРАСОЧНОГО МАТЕРИАЛА, МОДИФИЦИРОВАННОГО НАНОЧАСТИЦАМИ ZnO И БИОЦИДОМ

Разработано водно-дисперсионное огнебиозащитное покрытие на основе акриловой дисперсии, модифицированное наночастицами оксида цинка и биоцидом октилизотиазолиноном. Для обеспечения стабильности композиции наночастицы ZnO предварительно диспергировали ультразвуком с добавлением ПАВ, что предотвратило агломерацию. Введение наночастиц ZnO до 1,0% не ухудшает физико-механические свойства покрытия: адгезия (≥1 МПа), стойкость к статическому воздействию воды (≥24 ч), время высыхания (1 ч) и внешний вид сохраняются на уровне контрольного образца.

Установлен синергизм ZnO с интумесцентной системой (полифосфат аммония/пентаэритрит/меламин): при 1,0% ZnO достигнута I группа огнезащиты по ГОСТ 16363–98 «Средства огнезащитные для древесины. Методы определения огнезащитных свойств». Наночастицы интенсифицируют процесс разложения полифосфата аммония, что приводит к образованию термостабильного коксового барьера.

Биозащитные свойства покрытия существенно снижаются на деревянной подложке по сравнению со свободной пленкой. На древесине (лаг-фаза микромицетов >10 сут) полный фунгитоксичный эффект достигнут комбинацией 1,0% ZnO и 0,6% октилизотиазолинона, в то время как на свободной пленке полное ингибирование роста и развития грибов наблюдалось при 1,0% ZnO и 0,01% биоцида. Комбинирование наночастиц цинка (ZnO) с органическим биоцидом усиливает защиту от микробов. Разные механизмы действия антимикробных веществ делают их более эффективными и усложняют развитие устойчивости у микроорганизмов.

Ключевые слова: наночастицы ZnO, огнебиозащитные покрытия, октилизотиазолинон, интумесцентные системы, водно-дисперсионные материалы.

Для цитирования: Сабадаха Е. Н., Божелко И. К., Тригубович А. М., Степаньков Е. А. Синергетическое усиление огнебиозащитных характеристик водно-дисперсионного лакокрасочного материала, модифицированного наночастицами ZnO и биоцидом // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2025. № 2 (295). С. 109–115.
DOI: 10.52065/2520-2669-2025-295-14.

E. N. Sabadakha[1], I. K. Bozhelko[1], A. M. Trigubovich[2], E. A. Stepan'kov[1]
Belarusian State Technological University[1]
Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus[2]

SYNERGISTIC ENHANCEMENT OF FIRE-RESISTANT PROPERTIES IN WATER-DISPERSIBLE COATING MATERIALS MODIFIED WITH ZnO NANOPARTICLES AND BIOCIDE

A water-dispersible fire-retardant and bioprotective coating based on acrylic dispersion, modified with zinc oxide nanoparticles and the biocide octylisothiazolinone, has been developed. To ensure the stability of the composition, ZnO nanoparticles were pre-dispersed using ultrasonic treatment with the addition of surfactants, which prevented agglomeration. The introduction of ZnO nanoparticles up to 1.0% does not impair the physicomechanical properties of the coating: adhesion (≥1 MPa), resistance to static water exposure (≥24 hours), drying time (1 hour), and appearance are maintained at the level of the control sample.

Synergism between ZnO and an intumescent system (ammonium polyphosphate/pentaerythritol/melamine) was established: at 1.0% ZnO, fire protection class I according to GOST 16363–98 "Fire protective means for wood. Methods for determination of fire protective properties" was achieved. Nanoparticles intensify the decomposition process of ammonium polyphosphate, resulting in the formation of a thermally stable char barrier.

The bioprotective properties of the coating significantly decrease on a wooden substrate compared to a free film. On wood (mold fungi lag phase >10 days), complete fungitoxic effect was achieved with a combination of 1.0% ZnO and 0.6% OIT, whereas on a free film, complete inhibition of fungal growth and development was observed at 1.0% ZnO and 0.01% octylisothiazolinone. Combining zinc nanoparticles (ZnO) with an organic biocide enhances protection against microbes. Different mechanisms of action of antimicrobial agents make them more effective and complicate the development of resistance in microorganisms.

Keywords: ZnO nanoparticles, fire and bioprotective coatings, octylisothiazolinone, intumescent systems, wood bioresistance, water-dispersion materials.

For Citation: Sabadakha E. N., Bozhelko I. K., Trigubovich A. M., Stepankov E. A. Synergistic enhancement of fire-resistant properties in water-dispersible coating materials modified with ZnO nanoparticles and biocide. *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology*, 2025, no. 2 (295), pp. 109–115 (In Russian).

DOI: 10.52065/2520-2669-2025-295-14.

Введение. Современное развитие нанотехнологий значительно расширяет горизонты применения наноматериалов в различных отраслях промышленности. Благодаря своим уникальным физико-химическим свойствам – высокой площади поверхности, улучшенной механической прочности, фотокаталитическим и антибактериальным характеристикам – наноматериалы находят все более широкое применение в электронике, медицине, энергетике и материаловедении [1, 2].

Особое значение приобретает использование наноматериалов в полимерных композиционных материалах. Внедрение наночастиц в полимерные матрицы позволяет значительно улучшить их механические свойства, устойчивость к ультрафиолетовому излучению, а также придать новые функциональные свойства, например антибактериальные или самовосстанавливающиеся характеристики [3, 4]. Такие композиции находят применение в строительстве, автомобильной промышленности и упаковке.

Одним из наиболее перспективных видов наночастиц являются оксиды металлов, особенно оксид цинка (ZnO). Наночастицы ZnO обладают уникальными свойствами: высокой фотокаталитической активностью, антивирусными и антибактериальными эффектами, а также способностью защищать материалы от ультрафиолетового излучения [5, 6]. Эти свойства делают наночастицы цинка особенно привлекательными для использования в лакокрасочных покрытиях и других защитных материалах.

В последние годы активно исследуются возможности интеграции наночастиц ZnO в полимерные матрицы для получения покрытий с расширенными функциональными возможностями. Такой подход позволяет создавать покрытия с антивандальной стойкостью, самовосстанавливающимися свойствами и повышенной долговечностью [7, 8].

Основная часть. Целью исследования является изучение влияние различных концентраций наночастиц оксида цинка на свойства огнебиозащитного лакокрасочного материала и покрытия на его основе. Свойства наночастиц оксида цинка представлены в табл. 1.

В водно-дисперсионную композицию в виде суспензии вводили наночастицы оксида цинка в количестве 0,005; 0,01; 0,1; 1,0% от массовой доли нелетучих веществ лакокрасочного материала.

Для обеспечения равномерного распределения наночастиц оксида цинка в лакокрасочном материале их предварительно диспергировали в ультразвуковой ванне с добавлением смачивающей и диспергирующей добавки. Наночастицы ZnO склонны к образованию прочных агрегатов из-за высокого поверхностного натяжения и ван-дерваальсовых взаимодействий. Ультразвуковая обработка обеспечивает кавитацию, которая механически разрушает агломераты, способствуя получению стабильной и однородной дисперсии. Использование диспергирующей и смачивающей добавки дополнительно снижает поверхностное натяжение и предотвращает повторное агломерирование, обеспечивая стабильность полученной суспензии. Такой подход является одним из наиболее универсальных для введения наночастиц в полимерные и водно-дисперсионные матрицы. Эффективность ультразвука и ПАВ для стабилизации дисперсий ZnO описана в источниках [9, 10].

Таблица 1

Характеристика наночастиц оксида цинка

Характеристика	Показатель
Химическое наименование	Порошок оксида цинка
Химическая формула	ZnO
Фазовый состав	ZnO
Чистота, %	99,8
Размер, нм	20–80

Вспучивающиеся огнезащитные материалы являются многокомпонентными системами. Традиционно специальные компоненты, чаще всего применяемые во вспучивающихся покрытиях, разделяют на три основные группы: а) коксообразователи (как правило, это многоатомные спирты или полиолы – органические гидроксилсодержащие соединения с большим содержанием углерода); б) катализаторы (кислотные компоненты): неорганические кислоты или вещества, выделяющие кислоту при 100–250°С; в) вспенивающие агенты: органические амины или амиды, некоторые неорганические соли, способные при термическом разложении выделять значительное количество негорючих газов (как правило, это карбонаты щелочных металлов и аммонийные соли). Поэтому для придания огнезащитных свойств в рецептуру вводили интумесцентную систему (полифосфат аммония/пентаэритрит/меламин) [11].

Технологический процесс изготовления водно-дисперсионных лакокрасочных материалов, модифицированных наночастицами оксида цинка, по рецептуре, указанной в табл. 2, осуществлялся следующим образом.

Таблица 2

Рецептура огнезащитного состава

Компонент	Действующее вещество	Содержание, %
Дисперсия	Акриловая	20,00
Вспучивающий наполнитель	Меламин	6,00
Коксообразователь	Пентаэритрит	6,00
Катализатор	Полифосфат аммония	6,00
Диспергатор	ПАВ на основе полигликолевых эфиров	0,30
Загуститель	Целлюлозный	0,40
	Акриловый	0,40
Пеногаситель	Полиэфирмодифицированный силикон	0,20
Тарный консервант	Комбинация изотиазолинонов	0,10
Разбавитель	Вода	60,60
	Итого	100,00

Для обеспечения разрушения агломератов наполнителя, их смачивания, снижения поверхностного натяжения за счет электростатического отталкивания, стабилизации всей дисперсной системы и ликвидации пены на первой стадии равномерно распределяли по объему такие добавки, как пеногаситель, диспергатор и загуститель в течение 20 мин при 500 об/мин. Далее вносили суспензию наноматериалов. После распределения по объему наночастиц оксида цинка в раствор небольшими порциями вносились наполнители согласно загрузочной рецептуре. Скорость вращения фрезы увеличивали до 2000 об/мин. Суспензию диспергировали в течение 40 мин. Далее снижали скорость вращения фрезы до 500 об/мин и добавляли дисперсию. Перемешивание вели до получения однородной суспензии в течение 30 мин. Далее проверялся pH системы.

Были исследованы физико-механические и эксплуатационные свойства водно-дисперсионного материала и покрытия на его основе, а также составов, содержащих нанооксид. Свойства представлены в табл. 3. Введение наночастиц оксида цинка до 1,0% не повлияло на основные физико-механические и эксплуатационные параметры покрытий с учетом точности измерений, которые могут быть достигнуты современными инструментальными методами при оценке свойств лакокрасочных материалов и покрытий, что является подтверждением тому, что ZnO не ухудшает базовые характеристики лакокрасочной пленки. Низкие концентрации хорошо диспергированных наночастиц в полимерных матрицах (особенно в дисперсиях, в которых матрица уже сформирована) могут не оказывать значимого влияния на основные механические свойства покрытия, в то время как существенно улучшать функциональные свойства (огнезащита, антимикробность). Работа [12] подтверждает этот тезис для других нанонаполнителей.

Определение огнестойкости покрытий проводилось в соответствии с ГОСТ 16363. Сущность метода заключается в определении потери массы древесины, обработанной испытываемыми покрытиями, при огневом испытании в условиях, благоприятствующих аккумуляции тепла.

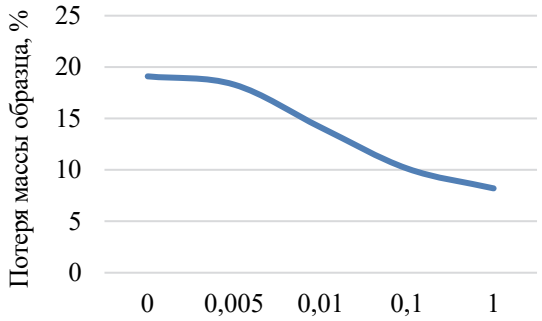
По результатам испытания устанавливают группу огнезащитной эффективности испытанного покрытия. При потере массы образца не более 9% для средства защиты древесины устанавливают I группу огнезащитной эффективности. При потере массы более 9%, но не более 25% для средств защиты древесины устанавливают II группу огнезащитной эффективности. При потере массы более 25% считают, что данное средство не обеспечивает огнезащиту древесины.

Таблица 3

Свойства лакокрасочного материала и покрытия

Наименование показателя	Характеристика	
	без нанодобавок	с добавками
Внешний вид покрытия	пленка с ровной, однородной матовой поверхностью	
Массовая доля нелетучих веществ, %, не менее	28,01 ± 0,05	28,01–29,00
pH краски	8–9	8–9
Время высыхания до степени 3 при температуре (20 ± 2)°С, ч, не более	1	1
Адгезия, МПа, не менее	1	1
Стойкость пленки к статическому воздействию воды при температуре (20 ± 2)°С, ч, не менее	24	24

Поскольку состав характеризуется низким содержанием нелетучих веществ, а обрабатываемый субстрат является пористым, для обеспечения требуемой огнестойкости критически важна толщина формируемой пленки. В связи с этим нанесение осуществляли в три слоя. Результаты исследований представлены на рисунке. На графике видна четкая зависимость улучшения огнезащиты: минимальный эффект при 0,005%, значительное улучшение при 0,01% и 0,1%, достижение I группы при 1,0%. Это указывает на сильный синергизм между нано-ZnO и классической интумесцентной системой полифосфат аммония/пентаэритрит/меламин.



Огнестойкость покрытий, модифицированных наночастицами оксида цинка, в соответствии с ГОСТ 16363

Синергизм нано-ZnO с интумесцентными добавками – активно изучаемая область. В литературе [13] описано, что ZnO может действовать как катализатор: ускоряет разложение полифосфата аммония (ПФА) и реакцию этерификации между ПФА и пентаэритритом, способствуя более раннему, интенсивному и равномерному вспучиванию. Это приводит к формированию более толстого, прочного и когерентного углеродного слоя (кокса). Также наночастицы оксида цинка интегрируются в образующийся углеродный слой, повышая его механическую прочность, термостабильность и барьерные свойства против тепла и летучих продуктов пиролиза. Также ZnO обладает хорошей теплопроводностью и может способствовать рассеиванию тепла на поверхности [13–15].

Так как лучшая огнестойкость без снижения эксплуатационных параметров покрытия была достигнута при содержании нано-ZnO 1%, а ранее проведенные исследования [16] показали, что наличие наночастиц оксида цинка ингибирует рост плесневых грибов, однако полностью не подавляет, то для придания биозащитных свойств покрытию необходимо вводить дополнительно биоцид. В качестве биоцида использовали октилизотиазолинон (OIT) торговой марки Росима 243 (технические характеристики представлены в табл. 4).

Таблица 4

Технические характеристики Росима 243

Характеристика	Показатель
Вид	Желтая прозрачная жидкость
Действующее вещество	Октилизотиазолинон, растворенный в диэтиленгликоле
Плотность, г/мл	0,963 ± 0,02
pH	3,7

Преимущества Росима 243 при использовании в качестве биоцида для лакокрасочного водно-дисперсионного материала и покрытия включают: высокую антимикробную эффективность; совместимость с водными системами – хорошо растворимы и стабилизируются в водных дисперсиях, что облегчает их внедрение в лакокрасочные материалы; минимальное влияние на свойства покрытия; относительно низкую токсичность для человека и окружающей среды.

В связи с необходимостью выбора действительно эффективных средств борьбы с плесневым поражением особую актуальность приобретает метод «агаровой сетки», разработанный в Институте микробиологии НАН Беларуси [17], который моделирует условия роста плесневых грибов, максимально приближенные к реальным. Метод экспресс-оценки фунгитоксичности материалов разработан с целью оптимизации и стандартизации условий роста микроскопических мицелиальных грибов на поверхности бетона, древесины, бумаги, лакокрасочных покрытий и других природных и синтетических материалов.

Сущность метода заключалась в том, что на поверхность испытуемых образцов, помещенных в чашки Петри с увлажненными бумажными фильтрами, наносили небольшое количество агаризованной питательной среды. Плесневые грибы нуждаются в легкодоступных источниках углерода, умеренной влажности, хорошей аэрации. Агаризованные питательные среды создают оптимальные условия для их развития. Однако нанесение слоя агаризованной среды на образец сплошным слоем не позволяет достоверно оценить фунгитоксичность из-за отсутствия контакта грибов с поверхностью материала. Устранить этот недостаток позволяет разделение тонкого слоя агаризованной среды сетью борозд на микроблоки с помощью сетчатого шаблона, толщина которого ограничивает высоту микроблоков. При этом создаются оптимальные условия для роста микромицетов, развитие которых тормозит только токсическое действие материала. Для формирования агаровой сетки мягкий агар переносили на образец, накладывали сверху сетчатый шаблон и равномерно распределяли агаризованную среду по нему с помощью шпателя, удаляя избыток среды. После снятия шаблона на образце должен оставаться слой равных по высоте миниатюрных блоков, разделенных сетью борозд.

Чашки Петри с образцами (не менее 5), инокулированными спорами тест-культуры, инкубировали в термостате при температуре 25°С и влажности, близкой 100%, в течение 10 сут. Критерием оценки действия материала на развитие микроскопических грибов служила лаг-фаза (время от посева до начала активного роста мицелия). Для определения длительности лаг-фазы ячейки «агаровой сетки» периодически (не реже 1 раза в сутки) снимали с поверхности образцов, переносили на предметное стекло и микроскопировали в проходящем свете для определения степени прорастания спор.

За результат испытаний принимали максимальную степень прорастания, установленную не менее чем для трех образцов. Если максимальная степень установлена на меньшем числе образцов, испытания повторяли на новых образцах, окрашенных лакокрасочным материалом из той же партии.

В качестве тест-культур использовали агрессивные штаммы грибов *Aspergillus versicolor, Aspergillus fumigatus, Aspergillus terreus, Penicillium chrysogenum*, выделенные из очагов плесневого поражения поверхности лакокрасочных покрытий, возникших в условиях различной температуры и влажности.

Результаты приведены в табл. 5. Критерием оценки фунгитоксичности покрытия служила лаг-фаза грибов (время от посева до массового прорастания спор).

Таблица 5

Лаг-фаза плесневых грибов на покрытиях, содержащих 1% наночастиц ZnO и биоцид

Содержание биоцида, %	Лаг-фаза, сут	
	деревянная поверхность	свободная пленка
0	3	3
0,005	3	5
0,01	3	>10
0,1	7	>10
0,2	9	>10
…	…	…
0,6	>10	>10

Лаг-фаза роста плесневых грибов увеличивается с ростом концентрации биоцида.

На деревянной подложке, окрашенной составом без биоцида, лаг-фаза микромицетов составила 3 сут, тогда как полное ингибирование роста грибов достигалось при 0,6%-м содержании биоцида в покрытии. На свободной пленке значительный эффект наблюдался уже при 0,01% октилизотиазолинона. Эффективность биоцида существенно снижается на деревянной подложке по сравнению со свободной пленкой. Компоненты древесины (лигнин, целлюлоза, экстрактивные вещества) активно сорбируют OIT, снижая его доступную концентрацию на поверхности. OIT может диффундировать вглубь древесины по порам. Таким образом, комбинация неорганических наночастиц (ZnO) с органическими биоцидами (OIT) – перспективная стратегия для синергизма и преодоления ограничений. Разные механизмы действия антимикробных веществ делают их более эффективными и усложняют развитие устойчивости у микроорганизмов. Вещества, такие как оксид цинка, при контакте с микроорганизмами могут стимулировать образование реактивных форм кислорода, таких как свободные радикалы, перекиси и другие окислительные агенты. Эти активные формы повреждают клеточные компоненты бактерий или грибов – мембраны, белки, ДНК – что приводит к их гибели. Также ионы Zn^{2+} могут проникать внутрь клеток и взаимодействовать с важными ферментами и структурами, нарушая их функции. Это вызывает стресс у микроорганизмов и способствует их уничтожению. Некоторые вещества, например использование OIT, блокируют ключевые ферменты или метаболические пути внутри микроорганизмов, что мешает их росту и размножению. Применение веществ с разными механизмами действия усложняет развитие устойчивости у микроорганизмов. В результате такие антимикробные средства обеспечивают более долгосрочную защиту покрытий и материалов от биологического разрушения [18].

Заключение. Разработано мультифункциональное водно-дисперсионное огнебиозащитное покрытие на основе акриловой дисперсии, модифицированное наночастицами ZnO (до 1,0%) и биоцидом октилизотиазолиноном (OIT), которое сохраняет физико-механические свойства (адгезия ≥1 МПа, стойкость к воде ≥24 ч) и демонстрирует синергизм компонентов: наночастицы ZnO катализируют формирование термостабильного коксового барьера в интумесцентной системе (полифосфат аммония/пентаэритрит/меламин), обеспечивая I группу огнезащиты по ГОСТ 16363, а в комбинации с OIT (0,6% для деревянной подложки) полностью подавляют развитие микромицетов (лаг-фаза >10 сут) за счет многокомпонентного механизма действия, что снижает риск резистентности и создает эффективное решение для комплексной защиты древесины.

Список литературы

1. Subramanian K. S. Nanomaterials: a review of their applications in Industry // Materials Today. 2020. Vol. 33, part 1. P. 26–35. DOI: 10.1016/j.mattod.2020.02.001.

2. Recent Advances in Nanomaterials for Energy and Environmental Applications / M. R Islam [et al.] // Nano Energy. 2019. Vol. 65. P. 104056. DOI: 10.1016/j.nanoen.2019.104056.

3. Singh S. K., Kumar A., Jain S. Polymer Nanocomposites: A Review of Their Mechanical and Functional Properties // Progress in Polymer Science. 2019. Vol. 98. P. 101149. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2019.101149.

4. Modern Strategies for the Enhancement of Polymer Properties by Incorporation of Nanoparticles / J. Wang [et al.] // ACS Nano. 2021. Vol. 15, no. 4. P. 6193–6210. DOI: 10.1021/acsnano.1c01393.

5. Properties and Applications of Zinc Oxide Nanoparticles / Y. Zhang [et al.] // Journal of Nanomaterials. 2019. Vol. 2019, art. ID 3719028. DOI: 10.1155/2019/3719028.

6. Antimicrobial and UV-Blocking Properties of ZnO Nanoparticles / L. Chen [et al.] // Materials Science and Engineering: C. 2020. Vol. 110. P. 110708. DOI 10.1016/j.msec.2020.110708.

7. Nanocomposite Coatings with Zinc Oxide for Protective Applications / A. Kumar [et al.] // Surface and Coatings Technology. 2022. Vol. 445. P. 128766. DOI 10.1016/j.surfcoat.2022.128766.

8. Functionalization of Polymer Matrices with ZnO Nanoparticles for Advanced Coatings / P. Garcia [et al.] // Progress in Organic Coatings. 2023. Vol. 181. P. 107629. DOI 10.1016/j.porgcoat.2023.107629.

9. Surface modification of inorganic nanoparticles for development of organic–inorganic nanocomposites – A review / S. Kango [et al.] // Progress in Polymer Science. 2013. Vol. 38, № 8. P. 1232–1261. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2013.02.003.

10. Tjong S. C. Structural and mechanical properties of polymer nanocomposites // Materials Science and Engineering: R: Reports. 2006. Vol. 53, no. 3–4. P. 73–197. DOI: 10.1016/j.mser.2006.06.001.

11. Сабирзянова Р. Н. Исследование влияния составляющих компонентов вспучивающего антипирена на огнестойкие свойства материалов // Вестник технологического университета. 2015. Т. 18, № 2. С. 283–287.

12. The change of the properties of acrylic-based polyurethane via addition of nano-silica / S. Zhou [et al.] // Progress in Organic Coatings. 2002. Vol. 45, no. 1. P. 33–42.

13. Alongi J., Frache A. Polyamide 6 nanocomposites with ZnO: Fire behaviour and thermal stability // Journal of Composite Materials. 2013. Vol. 47, no. 25. P. 3165–3172. DOI: 10.1177/0021998312464079.

14. Wang Z., Han E., Ke W. Influence of nano-LDHs on char formation and fire-resistant properties of flame-retardant coating // Progress in Organic Coatings. 2006. Vol. 55, no. 4. P. 329–335. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2006.01.003.

15. Synergistic effect between hydrophobic oxide nanoparticles and ammonium polyphosphate on fire properties of poly(methyl methacrylate) and polystyrene / L. Costes [et al.] // Polymer Degradation and Stability. 2017. Vol. 144. P. 411–422. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2017.09.006.

16. Сабадаха Е. Н., Гончарова И. А. Влияние нанооксида цинка на биозащитные свойства водно-дисперсионного лакокрасочного материала // Материалы 88-й науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов: сб. тез. докл., Минск, 29 янв. – 16 февр. 2024 г. Минск, 2024. С. 225–227.

17. Гончарова И. А., Мицкевич А. Г., Ровбель Н. М. Экспресс-оценка эффективности защиты материалов от плесневых грибов // Успехи медицинской микологии: III Всерос. конгресс по медицинской микологии, Москва, 24–25 марта 2005 г. М., 2005. Т. 5. С. 61–63.

18. Appalah B., Anand S. C. Synergistic antimicrobial effect of zinc oxide nanoparticles and biocides against microbes // Journal of Applied Microbiology. 2019. Vol. 127, no. 6. P. 1681–1693. DOI: 10.1111/jam.14415.

References

1. Subramanian K. S. Nanomaterials: A Review of Their Applications in Industry. *Materials Today*, 2020, vol. 33, part 1, pp. 26–35. DOI: 10.1016/j.mattod.2020.02.001.

2. Islam M. R., Islam M. M., Ashaduzzaman M., Shamsuzzaman M., Haque S., Sarker S., Mamun M. A. A. Recent Advances in Nanomaterials for Energy and Environmental Applications. *Nano Energy*, 2019, vol. 65. P. 104056. DOI: 10.1016/j.nanoen.2019.104056.

3. Singh S. K., Kumar A., Jain S. Polymer Nanocomposites: A Review of Their Mechanical and Functional Properties. *Progress in Polymer Science*, 2019, vol. 98. P. 101149. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2019.101149.

4. Wang J., Liu H., Tong Z., Liu C. Enhancement of Polymer Properties by Incorporation of Nanoparticles. *ACS Nano*, 2021, vol. 15, no. 4, pp. 6193–6210. DOI: 10.1021/acsnano.1c01393.

5. Zhang Y., Chen M.-M., Yang R.-Q., Wang L. Properties and Applications of Zinc Oxide Nanoparticles. *Journal of Nanomaterials*, 2019, vol. 2019, art. ID 3719028. DOI: 10.1155/2019/3719028.

6. Chen L., Li H., Liu R., Liu C., Zhang C., Li S., Wu D., Wang X., Wang Q. Antimicrobial and UV-Blocking Properties of ZnO Nanoparticles. *Materials Science and Engineering: C*, 2020, vol. 110. P. 110708. DOI: 10.1016/j.msec.2020.110708.

7. Kumar A., Singh N., Singh D.P., Kuma, P., Kaur J., Yadav R. S. Nanocomposite Coatings with Zinc Oxide for Protective Applications. *Surface and Coatings Technology*, 2022, vol. 445. P. 128766. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2022.128766.

8. Garcia P., Saldivia L., Cifuentes S., Salazar O., Morales J. R., Cifuentes G. Functionalization of Polymer Matrices with ZnO Nanoparticles for Advanced Coatings. *Progress in Organic Coatings*, 2023, vol. 181. P. 107629. DOI 10.1016/j.porgcoat.2023.107629.

9. Kango S., Kalia S., Celli A., Njuguna J., Habibi Y., Kumar R. Surface modification of inorganic nanoparticles for development of organic–inorganic nanocomposites – A review. *Progress in Polymer Science*, 2013, vol. 38, no. 8, pp. 1232–1261. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2013.02.003.

10. Tjong S. C. Structural and mechanical properties of polymer nanocomposites. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 2006, vol. 53, no. 3–4, pp. 73–197. DOI: 10.1016/j.mser.2006.06.001.

11. Sabirzyanova R. N. Investigation of the influence of intumescent flame retardant components on fire-resistant properties of materials. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Technological University], 2015, vol. 18, no. 2, pp. 283–287 (In Russian).

12. Zhou S., Wu L., Sun J., Shen W. The change of the properties of acrylic-based polyurethane via addition of nano-silica. *Progress in Organic Coatings*, 2002, vol. 45, no. 1, pp. 33–42.

13. Alongi J., Frache A. Polyamide 6 nanocomposites with ZnO: Fire behaviour and thermal stability. *Journal of Composite Materials*, 2013, vol. 47, no. 25, pp. 3165–3172. DOI: 10.1177/0021998312464079.

14. Wang Z., Han E., Ke W. Influence of nano-LDHs on char formation and fire-resistant properties of flame-retardant coating. *Progress in Organic Coatings*, 2006, vol. 55, no 4, pp. 329–335. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2006.01.003.

15. Costes L., Laoutid F., Brohez S., Delvosalle C., Dubois Ph. Synergistic effect between hydrophobic oxide nanoparticles and ammonium polyphosphate on fire properties of poly(methyl methacrylate) and polystyrene. *Polymer Degradation and Stability*, 2017, vol. 144, pp. 411–422. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2017.09.006.

16. Sabadakha E. N., Goncharova I. A. Influence of zinc oxide nanoparticles on bioprotective properties of water-dispersion paint materials. *Materialy 88-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh sotrudnikov i aspirantov: sbornik tezisov dokladov* [Proceedings of the 88th Scientific and Technical Conference of Faculty, Researchers, and Postgraduates: collection of Abstracts]. Minsk, 2024, pp. 225–227 (In Russian).

17. Goncharova I. A., Mitskevich A. G., Rovbel N. M. Rapid assessment of material protection effectiveness against mold fungi. *Uspekhi meditsinskoy mikologii: III Vserossiyskiy kongress po meditsinskoy mikologii* [Advances in Medical Mycology: III Russian National Congress on Medical Mycology]. Moscow, 2005, vol. 5, pp. 61–63 (In Russian).

18. Appalah B., Anand S. C. Synergistic antimicrobial effect of zinc oxide nanoparticles and biocides against microbes. *Journal of Applied Microbiology*, 2019, vol. 127, no. 6, pp. 1681–1693. DOI: 10.1111/jam.14415.

Информация об авторах

Сабадаха Елена Николаевна – кандидат технических наук, доцент кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: elenasabadaha@mail.ru

Божелко Игорь Константинович − кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии деревообрабатывающих производств, экодомостроения, дизайна мебели и интерьера. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: bikbstu@mail.ru

Тригубович Андрей Михайлович – научный сотрудник. Институт микробиологии НАН Беларуси (ул. Академика Купревича, 2, 220048, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: trigubovich777@gmail.com

Степаньков Евгений Александрович – студент. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: evginiy171@gmail.com

Information about the authors

Sabadakha Elena Nikolayevna – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: elenasabadaha@mail.ru

Bozhelko Igor Konstantinovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Wood Processing Technology, Eco-House Construction, and Furniture & Interior Design. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: bikbstu@mail.ru

Trigubovich Andrei Mikhaylovich – Researcher, the National Academy of Sciences of Belarus (2 Akademika Kuprevicha str., 220048, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: trigubovich777@gmail.com

Stepankov Evgenii Aleksandrovich – student. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: evginiy171@gmail.com

Поступила 09.06.2025