

УДК 677.494

DOI 10.47367/0021-3497_2024_5_108

**ПОЛИПРОПИЛЕНОВАЯ НИТЬ, МОДИФИЦИРОВАННАЯ
СТАБИЛИЗИРОВАННЫМИ НАНОЧАСТИЦАМИ МЕДИ**

**POLYPROPYLENE YARN MODIFIED
WITH STABILIZED COPPER NANOPARTICLES**

Н.П. ПРОРОКОВА, С.Ю. ВАВИЛОВА

N.P. PROROKOVA, S.Yu. VAVILOVA

(Институт химии растворов им. Г.А. Крестова Российской академии наук)

(G.A. Krestov Institute of solution chemistry of the Russian academy of sciences)

E-mail: npp@isc-ras.ru

Изучены антимикробные свойства полипропиленовой текстильной нити, объемно модифицированной стабилизированными стеаратом натрия наночастицами меди в количестве 0,5...1,0 % масс. Показано, что в результате объемного модифицирования полипропиленовая нить приобретает фунгицидные свойства. Исследовано влияние введения в расплав полимера наночастиц меди на процесс формирования полипропиленовых текстильных нитей и их основные физико-механические свойства. Показано, что введение в полипропилен до 0,5 % наночастиц не оказывает отрицательного влияния на стабильность протекания процесса формирования и прочность нити. Проведен анализ достоинств и недостатков объемного модифицирования полипропиленовой нити малыми количествами наночастиц меди, стабилизированных стеаратом натрия.

The antimicrobial properties of polypropylene textile thread bulk modified with sodium stearate-stabilized copper nanoparticles in an amount of 0.5...1.0% by weight were studied. It has been shown that as a result of bulk modification, polypropylene yarns acquires fungicidal properties. The effect of addition copper nanoparticles into the polymer melt on the process of spinning polypropylene textile yarns and their basic physical and mechanical properties was studied. It has been shown that the introduction of up to 0.5% nanoparticles into polypropylene does not have a negative effect on the stability of the spinning process and the tensile strength of the yarns. An analysis of the advantages and disadvantages of bulk modification of polypropylene yarns with small amounts of copper nanoparticles stabilized with sodium stearate was carried out.

Ключевые слова: полипропиленовая текстильная нить, объемное модифицирование, стабилизированные наночастицы меди, фунгицидность, прочность.

Keywords: polypropylene textile yarn, bulk modification, stabilized nanoparticles of copper, fungicidal, tensile strength.

Введение

Иммобилизация в термопластичных полимерах модифицирующих веществ посредством введения их в расплав волокнообразующего полимера при формовании является простым, экономичным и перспективным способом придания изделиям из этих полимеров новых и улучшенных свойств [1, 2]. Однако способ объемного модифицирования, широко используемый при получении массивных полимерных изделий, практически не применяется для модификации нитей из термопластичных полимеров. Это связано в основном с двумя факторами. Во-первых, введение в высокоориентированную фибриллярную структуру элементарных нитей даже микроразмерных частиц наполнителя нарушает ее, что приводит к дестабилизации процессов формования и ориентационного вытягивания, вызывая рост обрывности нитей и потерю их прочности. Во-вторых, частицы наполнителя засоряют фильеры, с помощью которых формируются нити. Отсюда следует, что для объемного модифицирования термопластичных нитей в процессе их получения из расплава можно использовать только наноразмерные наполнители, причем их размеры должны сохраняться неизменными в продолжение всего процесса формования нитей. Однако известно, что неотъемлемым свойством наночастиц, определяемым их высокой поверхностной энергией, является склонность к агрегации. Следовательно, для нейтрализации этой тенденции наноразмерные наполнители должны использоваться в стабилизированном состоянии.

В ИХР РАН в последнее десятилетие выполнена серия работ по исследованию процесса объемного модифицирования полипропиленовых нитей композиционными наполнителями – металлсодержащими наночастицами, стабилизированными в процессе их синтеза полиэтиленом низкой плотности

[3...6]. В работе использовались металлсодержащие наночастицы, обладающие биологической активностью. Такой способ модифицирования обеспечивает придание нитям повышенной прочности на разрыв, устойчивых антимикробных свойств, приводит к снижению их поверхностного электрического сопротивления. Но он обладает и некоторыми недостатками. В частности, указанные композиционные наполнители довольно сложно синтезировать. Более традиционным и простым способом стабилизации наночастиц является снижение их поверхностной энергии за счет обработки поверхностно-активным веществом (ПАВ) [7, 8], однако использование наночастиц, стабилизированных ПАВ, в качестве наполнителей при объемном модифицировании термопластичных нитей мало исследовано.

В настоящей работе проводилась оценка эффективности использования наночастиц меди, стабилизированных стеаратом натрия, для объемного модифицирования полипропиленовых комплексных нитей в целях придания им антимикробных свойств при сохранении высоких физико-механических характеристик.

Полипропиленовые волокна и изделия из них широко используются при изготовлении медицинской одежды и белья, поэтому придание им антимикробных свойств является актуальной задачей. Медьсодержащие наночастицы выбраны в качестве перспективного модификатора в связи с тем, что обладают широким спектром антимикробного действия [9, 10]. Процессы формования полипропиленовых нитей реализуются при повышенных температурах, поэтому в качестве ПАВ для стабилизации наночастиц на основании предварительных исследований был выбран стеарат натрия, обладающий термической стабильностью.

Материалы и методы

Для работы использовали изотактический полипропилен (ПП) марки Бален 01250 (ОАО «Уфаоргсинтез», ТУ 2211-015-00203521-99). Показатель текучести расплава ПП составлял 25 г / 10 мин, температура плавления – 169 °С.

В качестве наполнителя использовали порошок на основе медьсодержащих наночастиц, которые синтезировали методом катодного восстановления из водно-этанольных растворов сульфата меди в условиях замедленной стадии диффузии катионов на предельной плотности тока [11...13]. Получали наночастицы диаметром до 60 нм, обладающие устойчивостью при повышенных температурах [14]. На основе медьсодержащего порошка готовили водную суспензию, в которую для стабилизации наночастиц добавляли расчетное количество стеарата натрия. Суспензию обрабатывали ультразвуком для повышения ее устойчивости. После этого суспензию высушивали до получения порошка. Рассчитанное количество медьсодержащего порошка наносили на необходимое количество гранулированного полипропилена, механическую смесь загружали в экструдер и методом формования из расплава получали медьсодержащие полипропиленовые комплексные текстильные нити.

Полипропиленовые комплексные текстильные нити (ПКТН) получали на лабораторном стенде для формования синтетических волокон СФПВ-1. Ориентационное вытягивание свежесформованных ПКТН осуществляли на стенде для ориентации синтетических волокон ОСВ-1. Стенды позволяют имитировать условия производственного процесса формования нитей из расплава и их ориентационного вытягивания. Схемы стендов представлены в работе [3].

Формовочный стенд СФПВ-1 оснащен автоматизированным пультом управления процессом формования, экструдером, в котором происходит плавление полимера, фильерой с 24 отверстиями ($\varnothing=0.4$ мм) для образования из расплава струй, формовочными дисками, а также приемным устройством для намотки готовых нитей на бобину. В процессе эксперимента темпера-

тура зон экструдера составляла: зоны преднагрева $T_1 = 120^\circ\text{C}$, зоны плавления $T_2=225^\circ\text{C}$, зоны стабилизации расплава $T_3=220^\circ\text{C}$, зоны нагрева формовочной головки $T_4 = 220^\circ\text{C}$. Скорость подачи расплава составляла 20 г/мин, скорость приемного устройства – 100 м/мин.

После формования ПКТН подвергали ориентационному вытягиванию и термостабилизации с использованием стенда ОСВ-1. При ориентационном вытягивании нитей температуры в зонах вытягивания составляли: $T_1 = 130^\circ\text{C}$ (верхний обогреваемый диск), $T_2 = 140^\circ\text{C}$ (нижний обогреваемый диск), $T_3 = 155^\circ\text{C}$ (термоэлектростабилизационное устройство). Скорость ориентационного вытягивания составляла 12...16 м/мин.

Получены стандартные и модифицированные стабилизированными медьсодержащими наночастицами комплексные ПКТН диаметром 30...40 мкм, состоящие из 24 филаментов плотностью 0.91 г/см^3 .

Основные физико-механические характеристики ПП нитей определяли при однократном растяжении их до разрыва на модернизированной разрывной машине 2099-Р-5 (ОАО «Точприбор», Россия) в соответствии с ГОСТ 6611.2-73 (ИСО 2062-72, ИСО 6939-88).

Микрофотографии ПП нитей получали с помощью оптического микроскопа фирмы «Биомед» (Россия), оснащенного вебкамерой (1,3 Мпикс).

Оценку влияния модифицированного волокнистого материала на жизнедеятельность патогенных микроорганизмов проводили в соответствии с ASTM E2149 (10 Standard Test Method for Determining the Antimicrobial Activity of Immobilized Antimicrobial Agents Under Dynamic Contact Conditions. USA, 2001). Для нее применяли типичные тестовые культуры: *Staphylococcus aureus* 6538-Р ATCC 209-Р FDA (золотистый стафилококк), *Escherichia coli* штамм М-17 (кишечная палочка) и *Candida albicans* ССМ (кандида альбиканс) ATCC 90028 – соответственно грамположительная, грамотрицательная бактериальные культуры, дрожжеподобные микроскопические грибы. Стандартную навеску нити поме-

щали в физиологический раствор, в который введено определенное количество колоний микробов в виде суспензии. Пробирки при постоянном встряхивании оставляли при комнатной температуре в течение 24 часов. Количество содержащихся в растворе колоний микробов определяли по изменению коэффициента пропускания раствора (контрольный образец – коэффициент пропускания 100%), который определялся мутностью раствора, зависящей от количества содержащихся в нем колоний.

Оценку фунгицидных свойств модификатора, нанесенного на поверхность волокнистого материала, проводили с использованием *Candida albicans* ССМ (кандида альбиканс) АТСС 90028 в соответствии с ГОСТ ISO 20645-2014 (Межгосударственный стандарт «Изделия текстильные. Определение антибактериальной активности. Диффузное испытание в чашках с агаровой средой»). Используемый тест основан на определении величины зоны задержки роста микроорганизмов вокруг образца. Пробы испытуемого материала (нетканое полипропиленовое полотно с нанесенными на поверхность стабилизированными наночастицами меди) выкладывали в чашку Петри на поверхность питательной среды (агара), предварительно засеянной «методом газона» испытуемым тест-микробом. Посевы культивировали в течение 24 ч в термостате при 37 °С.

Результаты и обсуждение

С использованием «счетного метода» проведена оценка антимикробных свойств полипропиленовых комплексных текстильных нитей, объемно модифицированных стабилизированными стеаратом натрия наночастицами меди. Указанный метод является количественным и обычно используется для характеристики эффективности действия немигрирующих препаратов, химически связанных с волокном [15]. Поэтому для оценки антимикробной активности наночастиц, иммобилизованных в структуре волокна, целесообразно применить именно его.

Из табл. 1 видно, что наибольшая активность у ПКТН, содержащих наночастицы

меди, проявляется в отношении условно патогенных микрогрибов *Candida alb.* При содержании наночастиц меди 0,5 % ПКТН приобретает способность существенно замедлять рост микрогрибов, а при концентрации 1,0 % нить становится фунгицидной.

Т а б л и ц а 1

Содержание наночастиц Cu в нити, % масс.	Ингибирование жизнедеятельности микроорганизмов, %		
	Escherichia coli	Staphylococcus aureus	Candida albicans
0	37	48	43
0,5	47	73	92
1,0	50	78	99

Для выяснения того, снижает ли иммобилизация наночастиц меди во внутренние области ПКТН интенсивность их воздействия на микрогрибы, были изготовлены образцы полипропиленового нетканого полотна с нанесенным на поверхность различным количеством медьсодержащего порошка. Антигрибковая активность образцов была оценена методом посева. Результаты эксперимента представлены на рис. 1 (противогрибковая активность образцов ПП нетканого полотна с нанесенными на поверхность наночастицами меди, содержащими: К (контрольный образец) – 0%; 1 – 0,3%; 2 – 0,5%; 3 – 1%).

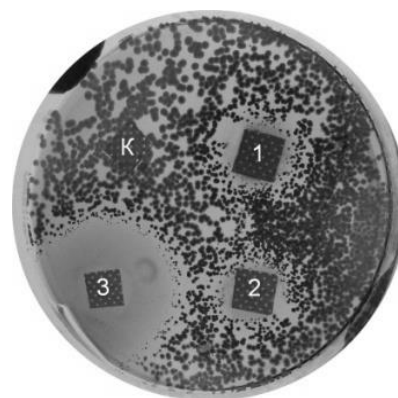


Рис. 1

Видно, что контрольный образец (К) не подавляет рост культуры *Candida alb.* Образцы, содержащие наночастицы меди (1, 2, 3), проявляют противогрибковую активность. Образцы 1 и 2, соответственно со-

держащие 0,3 и 0,5 % наночастиц меди, обладают умеренным противогрибковым действием, образец 3 (содержание наночастиц меди 1,0 %) – сильным. Результаты исследований в плотной питательной среде хорошо согласуются с результатами оценки биологической активности в жидкой питательной среде (табл. 1). Сопоставление данных табл. 1 и рис. 1 показывает, что иммобилизация наночастиц меди во внутренних областях ПКТН не приводит к снижению фунгицидной активности наночастиц. Напротив, ПКТН после внедрения в ее структуру наночастиц меди также приобретает противогрибковые свойства.

Известно, что основной антимикробной стратегией ионов и наночастиц меди является так называемое «контактное уничтожение», при котором происходит контакт медьсодержащих поверхностей или наночастиц меди, высвобождающих ионы меди, с микробной поверхностью [9]. Хотя единого мнения относительно точных последовательных событий «контактного уничтожения» не существует, известно, что высвобожденные ионы меди продуцируют активные формы кислорода на поверхности бактерий и приводят к разрушению клеточной мембраны [10]. Механизм повреждения клеток микроорганизмов зависит также от степени окисления меди [16].

О том, как иммобилизация наночастиц меди в структуре ПКТН скажется на основных физико-механических характеристиках нити, судили по данным, представленным в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Содержание наночастиц меди, %	Удельная разрывная нагрузка, сН/текс	Относительное разрывное удлинение
0	52,3 ± 1,7	45,3 ± 2,0
0,5	54,9 ± 2,7	50,3 ± 2,6
1,0	47,6 ± 2,6	53,4 ± 2,9

Процесс формования ПКТН, содержащих 0,5 % наночастиц меди, протекает достаточно стабильно. Введение в полипропилен 1 % наночастиц меди приводит к возникновению затруднений при формовании, нестабильности процесса, вызывающей обрывность нитей. При введении в ПКТН 0,5 % наночастиц меди прочность нити остается на исходном уровне, но несколько увеличивается относительное удлинение. При содержании в ПКТН 1 % наночастиц меди удельная разрывная нагрузка нитей незначительно уменьшается.

На рис. 2 представлены диаграммы растяжения до разрыва немодифицированной и модифицированной наночастицами меди ПКТН: а) немодифицированных; б) содержащих 0,5 % наночастиц меди.

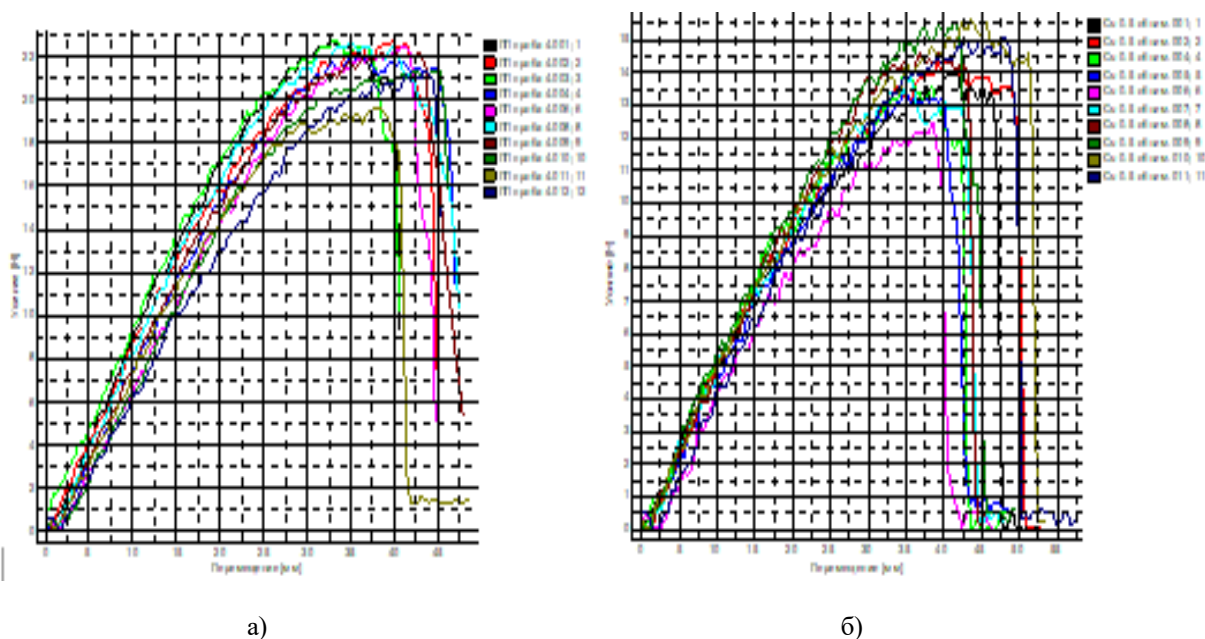


Рис. 2

Из представленных на рис. 2 диаграмм следует, что введение в ПКТН наночастиц меди не оказывает отрицательного влияния на ее равномерность. Однако ПКТН, содержащая наночастицы меди, характеризуется большим колебательным откликом при приложении нагрузки, что проявляется в ребристости кривых, приведенных на диаграммах.

Отсутствие положительного влияния на прочность модифицированной нити введения наночастиц меди в ПКТН может быть связано с недостаточной стабильностью размеров наночастиц, сохранивших остаточную способность к образованию агрегатов даже после стабилизации стеаратом натрия. Известно, что внедрение в структуру полимерного материала крупных частиц может привести к накоплению избыточных напряжений, вызывающему образование внутренних микродефектов, следствием чего является снижение прочности. Агрегаты наночастиц внутри филамента хорошо видны на микрофотографиях (рис. 3 – микрофотографии ПКТН, содержащих 0,5% наночастиц меди: а) увеличение в 1000 раз; б) увеличение в 400 раз).

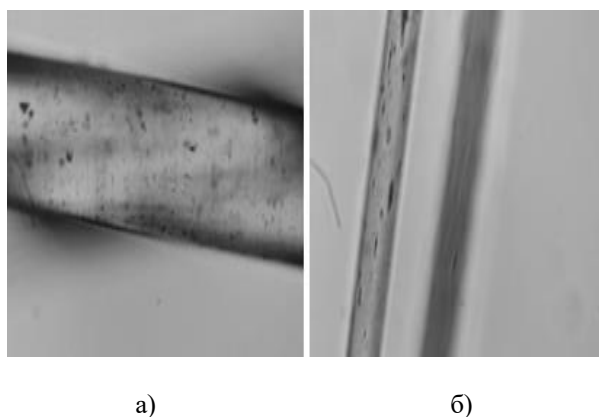


Рис. 3

По-видимому, при введении в ПКТН 1 % наночастиц меди наночастицы формируют такое количество агрегатов, которое приводит к некоторому снижению прочности нити.

ВЫВОДЫ

Показано, что наночастицы меди после иммобилизации в структуре ПКТН не снижают свою антигрибковую активность.

ПКТН, объемно модифицированные наночастицами меди, приобретают способность подавлять жизнедеятельность микрогрибов: при содержании меди 0,5 % ПКТН существенно замедляет их рост, а при концентрации 1,0 % нить становится фунгицидной.

Установлено, что стабилизированные стеаратом натрия наночастицы меди сохраняют остаточную способность к образованию агрегатов в процессе модифицирования нитей. В связи с этим роста прочности ПКТН, модифицированной наночастицами меди, не наблюдается. При содержании меди 0,5 % прочность остается на исходном уровне, а при концентрации 1,0 % происходит незначительное снижение прочности.

Таким образом, ПКТН, содержащая 0,5 % стабилизированных стеаратом натрия наночастиц меди, приобретает умеренные антигрибковые свойства при сохранении исходного уровня прочности. ПКТН, содержащая 1,0 % стабилизированных стеаратом натрия наночастиц меди, проявляет фунгицидные свойства, но процесс ее формирования становится нестабильным и несколько уменьшается прочность нити.

Благодарности

Авторы выражают благодарность д.х.н. Парфенюку В.И., к.х.н. Чуловской С.А., к.х.н. Кузьмину С.М., к.х.н. Тесаковой М.В. (ИХР РАН) за помощь в синтезе медьсодержащих наночастиц, д.б.н. Кузнецову О.Ю. (ИГМУ) за помощь в проведении микробиологического анализа.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования научным оборудованием «Верхневолжский региональный центр физико-химических исследований».

ЛИТЕРАТУРА

1. Functional Fillers for Plastics / Ed. by M. Xanthos. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2005.
2. Functional Fillers for Plastics: Second, updated and enlarged ed., M. Xanthos (ed.), Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2010.
3. Пророкова Н.П., Вавилова С.Ю., Бирюкова М.И. и др. Модифицирование полипропиленовых нитей с использованием наноразмерных металлсодержащих частиц, иммобилизованных в полиэтиленовой матрице // Российские нанотехнологии. 2014, 9, 9-10. С. 21...27.

4. Пророкова Н.П., Вавилова С.Ю., Кузнецов О.Ю., Бузник В.М. Антимикробные свойства полипропиленовых нитей, модифицированных стабилизированными полиэтиленом металлосодержащими наночастицами // Российские нанотехнологии. 2015, 10, 9-10. С. 50...57.
5. Пророкова Н.П., Вавилова С.Ю., Бирюкова М.И. и др. Полипропиленовые нити, модифицированные стабилизированными в полиэтилене железосодержащими наночастицами // Химические волокна. 2015, 5. С. 47...54.
6. Юрков Г.Ю., Пророкова Н.П., Козинкин А.В. и др. Полипропиленовые нити, модифицированные марганецсодержащими наночастицами // Механика композитных материалов. 2022, 58, 5. С. 1011...1030.
7. Геллер В.Э. О возможности получения нанокompозитных текстильных нитей // Химические волокна. 2013, 2. С. 3...9.
8. Zhang G., Xiao Y., Yan J. *etc.* Ultraviolet light-degradation behavior and antibacterial activity of polypropylene/ZnO nanoparticles fibers // *Polymers*. 2019, 11. 1841.
9. Mitra D., Kang E.T., Neoh K.G. Antimicrobial copper-based materials and coatings: Potential multifaceted biomedical applications // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2020, 12, 19. P. 21159...21182.
10. Cheeseman S., Christofferson A.J., Kariuki R. *etc.* Antimicrobial metal nanomaterials: From passive to stimuli-activated applications // *Adv. Sci.* 2020, 7, 10. 1902913.
11. Кузьмин С.М., Чуловская С.А., Балмасов А.В., Парфенюк В.И. Электрохимические процессы на медном электроде в водно-этанольных растворах сульфата меди // Журнал общей химии. 2011, 81, 3. С. 367...372.
12. Носков А.В., Чуловская С.А., Балмасов А.В., Парфенюк В.И. Влияние гидродинамического режима на скорость катодного восстановления меди из водно-этанольных сред // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2012, 48, 5. С.435...439.
13. Вавилова С.Ю., Чуловская С.А., Кузьмин С.М. и др. Новый композиционный полипропиленовый материал с улучшенными физико-химическими и потребительскими свойствами // Журнал прикладной химии. 2011, 84, 12. С. 2053...2058.
14. Чуловская С.А., Парфенюк В.И. Влияние состава электролитного раствора на процесс электрохимического синтеза наноразмерных медьсодержащих порошков // Электронная обработка материалов. 2008. № 1. С. 58...63.
15. Кудрявцева Е.В., Буринская А.А. Качественная оценка хлопчатобумажных текстильных материалов, модифицированных бикомпонентными наночастицами металлов // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2022. № 6 (402). С. 106...116.
16. Meghana S., Kabra P., Chakraborty S., Padmavathy N. Understanding the pathway of antibacterial activity of copper oxide nanoparticles // *RSC Advances*. 2015, 5, 16. P. 12293...12299.
1. Functional Fillers for Plastics / Ed. by M. Xanthos. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2005.
2. Functional Fillers for Plastics: Second, updated and enlarged ed., M. Xanthos (ed.), Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2010.
3. Prorokova N.P., Vavilova S.Yu., Biryukova M.I. *etc.* Modification of Polypropylene Filaments with Metal Containing Nanoparticles Immobilized in a Polyethylene Matrix // *Nanotechnologies in Russia*. 2014, 9, 9-10. P. 533...540.
4. Prorokova N.P., Vavilova S.Yu., Kuznetsov O.Yu., Buznik V.M. Antimicrobial Properties of Polypropylene Yarn Modified by Metal Nanoparticles Stabilized by Polyethylene // *Nanotechnologies in Russia*. 2015, 10, 9-10. P. 732...740.
5. Prorokova N.P., Vavilova S.Yu., Biryukova M.I. *etc.* Polypropylene Threads Modified by Iron-containing Nanoparticles Stabilized in Polyethylene // *Fibre Chemistry*. 2016, 47, 5. P. 384...389.
6. Yurkov G.Y., Prorokova N.P., Kozinkin A.V. *etc.* Polypropylene filaments modified with manganese-containing nanoparticles // *Mechanics of composite materials*. 2022, 58, 5. P. 705...718.
7. Geller V.E. Prospects for preparing nanocomposite textile yarn (review) // *Fibre Chemistry*. 2013, 45, 2. P. 65...70.
8. Zhang G., Xiao Y., Yan J. *etc.* Ultraviolet light-degradation behavior and antibacterial activity of polypropylene/ZnO nanoparticles fibers // *Polymers*. 2019, 11. 1841.
9. Mitra D., Kang E.T., Neoh K.G. Antimicrobial copper-based materials and coatings: Potential multifaceted biomedical applications // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2020, 12, 19. P. 21159...21182.
10. Cheeseman S., Christofferson A.J., Kariuki R. *etc.* Antimicrobial metal nanomaterials: From passive to stimuli-activated applications // *Adv. Sci.* 2020, 7, 10. 1902913.
11. Kuz'min S.M., Chulovskaya S.A., Parfenyuk V.I., Balmasov A.V. Electrochemical processes on the copper electrode in water-ethanol solutions of copper sulfate // *Russian Journal of General Chemistry*. 2011, 81, 3. P. 463...469.
12. Noskov A.V., Chulovskaya S.A., Parfenyuk V.I., Balmasov A.V. The effect of hydrodynamic conditions on the rate of copper cathodic reduction from aqueous ethanol environments // *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2012, 48, 5. P. 520...523.
13. Vavilova S.Yu., Chulovskaya S.A., Kuz'min S.M. *etc.* A New Composite Polypropylene Material with Improved Physicochemical and Consumer Properties // *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2011, 84, 12. P. 2137...2140.
14. Chulovskaya S.A., Parfenyuk V.I. Influence of the electrolytic composition on the process of electrochemical synthesis of nanodimensional cupriforous powders // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2008, 44, 1. P. 50...54.

15. *Kudriavtseva E.V., Burinschaia A.A.* Qualitative assessment of cotton textile materials modified with bi-component metallic nanoparticles // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. 2022, 6, 402. P.106...116.

16. *Meghana S., Kabra P., Chakraborty S., Padmavathy N.* Understanding the pathway of antibacterial activity of copper oxide nanoparticles // *RSC Advances*. 2015, 5, 16. P. 12293...12299.

Рекомендована НИО 4 «Формирование новых функциональных свойств полипропиленовых и природных целлюлозосодержащих волокнистых материалов с применением наноразмерных дисперсий и химических, плазмохимических и гидроакустических воздействий». Поступила 27.03.24.
