

ПОЛИПРОПИЛЕНОВЫЕ НИТИ, МОДИФИЦИРОВАННЫЕ ПРИ ФОРМОВАНИИ ИЗ РАСПЛАВА СТАБИЛИЗИРОВАННЫМИ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИМИ НАНОЧАСТИЦАМИ МЕДЬ-СЕРЕБРО

Н.П. Пророкова¹, С.Ю. Вавилова¹, В.Е. Кириллов², Г.Ю. Юрков², В.М. Бузник³

¹Научно-исследовательский отдел 4, Институт химии растворов им. Г.А. Крестова Российской академии наук, ул. Академическая, 1, Иваново, Россия, 153045

²Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук, ул. Косыгина, 4, Москва, Россия, 119991

³Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова Российской академии наук, Ленинский пр., 31, Москва, Россия, 119991

E-mail: npp@isc-ras.ru, sjv@isc-ras.ru, kirillovladislav@gmail.com, ygy76@mail.ru, buznikv@list.ru

В работе приведены результаты исследования влияния на процесс формования из расплава комплексных полипропиленовых текстильных нитей малых количеств композиционных наполнителей, которые представляют собой биметаллические наночастицы медь-серебро. Наночастицы синтезированы полиольным методом и стабилизированы полиэтиленом низкой плотности путем введения их в расплав. Модифицированные комплексные полипропиленовые нити сформованы с помощью лабораторных стендов для формования и ориентационного вытягивания нитей, которые позволяют имитировать производственные условия получения термопластичных текстильных нитей. Методами оптической, просвечивающей, сканирующей электронной микроскопии, а также ИК спектроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния изучено распределение наполнителей в структуре модифицированной нити. Показано, что наполнитель распределяется в объеме нити равномерно. Часть его присутствует в приповерхностном слое модифицированной нити. Исследована морфология поверхности модифицированных нитей. Оценено влияние введения малых количеств композиционных наполнителей в структуру полипропиленовых комплексных текстильных нитей на их основные физико-механические характеристики. Установлено, что при использовании композиционного наполнителя с низким содержанием стабилизированных полиэтиленом низкой плотности биметаллических наночастиц наблюдается увеличение прочности нитей. Оценены антимикробные свойства полипропиленовых нитей, содержащих малые количества наноразмерных частиц медь-серебро, стабилизированных полиэтиленом низкой плотности. Установлено, что модифицированная нить проявляет хорошую антимикробную активность по отношению к грам-положительным микроорганизмам, также имеет место некоторое ингибирующее воздействие на условно патогенные микроорганизмы. Ингибирование жизнедеятельности микроорганизмов реализуется при непосредственном их контакте с нитью, т.е. полипропиленовая нить в результате модифицирования приобретает барьерные антимикробные свойства.

Ключевые слова: полипропиленовая комплексная текстильная нить, биметаллические наночастицы медь-серебро, стабилизация наночастиц, барьерные антимикробные свойства

Для цитирования:

Пророкова Н.П., Вавилова С.Ю., Кириллов В.Е., Юрков Г.Ю., Бузник В.М. Полипропиленовые нити, модифицированные при формовании из расплава стабилизированными биметаллическими наночастицами медь-серебро. *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва)*. 2025. Т. LXIX. № 4. С. 69–76. DOI: 10.6060/rcj.2025694.11.

For citation:

Prorokova N.P., Vavilova S.Yu., Kirillov V.E., Yurkov G.Yu., Bouzник V.M. Polypropylene yarns modified during melt spinning with stabilized copper-silver bimetallic nanoparticles. *Ros. Khim. Zh.* 2025. V. 69. N 4. P. 69–76. DOI: 10.6060/rcj.2025694.11.

POLYPROPYLENE YARNS MODIFIED DURING MELT SPINNING WITH STABILIZED COPPER-SILVER BIMETALLIC NANOPARTICLES

N.P. Prorokova¹, S.Yu. Vavilova¹, V.E. Kirillov², G.Yu. Yurkov², V.M. Bouznik³

¹G.A. Krestov Institute of solution chemistry of the Russian Academy of sciences, Akademicheskaya street, 1, Ivanovo, 153045, Russian Federation

²N.N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics Russian Academy of Sciences, Kosygina Street, 4, Moscow, 119991, Russian Federation

³N.S. Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry of the Russian Academy of sciences, Leninsky av., 31, Moscow, 119991, Russian Federation

E-mail: npp@isc-ras.ru, sjv@isc-ras.ru, kirillovladislav@gmail.com, ygy76@mail.ru, buznikv@list.ru

The paper presents the results of the influence study of composite fillers small amounts, which are bimetallic copper-silver nanoparticles on the process of melt spinning of complex polypropylene textile yarns. The nanoparticles were synthesized using the polyol method and stabilized with low-density polyethylene by injecting them into the melt. Modified complex polypropylene yarns were formed using laboratory stands for spinning and orientation drawing of yarns, which make it possible to simulate production conditions for getting thermoplastic textile yarns. The distribution of fillers in the structure of the modified yarns was studied using optical, transmission, scanning electron microscopy, as well as IR spectroscopy and Raman spectroscopy. It was shown that the filler is distributed evenly throughout the yarns volume. Some of it was present in the surface layer of the modified yarns. The morphology of surface of yarns was investigated. The injection influence of composite fillers small amounts into the structure of polypropylene complex textile yarns on their main physical and mechanical characteristics was assessed. It was established that using a composite filler with a low content of bimetallic nanoparticles stabilized by low-density polyethylene leads to an increase in the strength of yarns. The antimicrobial properties of polypropylene yarns containing small amounts of nanosized copper-silver particles stabilized by low-density polyethylene were determined. It was established that the modified yarns exhibits good antimicrobial activity against gram-positive microorganisms, and also has some inhibitory effect on opportunistic microfungi. Inhibition of microorganism activity is achieved through their direct contact with the yarns, i.e., as a result of modification, the polypropylene yarns acquire barrier antimicrobial properties.

Keywords: polypropylene complex textile yarns, bimetallic copper-silver nanoparticles, stabilization of nanoparticles, barrier antimicrobial properties

ВВЕДЕНИЕ

Наночастицы металлов играют важную роль в новых технологиях модификации волокнистых материалов [1-3]. В последние годы все большее внимание исследователей привлекают биметаллические наночастицы, так как их физические и химические свойства могут существенно отличаться от свойств исходных компонентов, а в ряде случаев, благодаря синергическому эффекту, некоторые свойства значительно усиливаются [4]. Например, известно, что хотя наноразмерные биологически активные частицы меди и серебра широко используются для придания волокнистым материалам антимикробных свойств [1, 5-8], применение для этих

целей биметаллических наночастиц медь-серебро более эффективно [9, 10]. Это позволяет заменить индивидуальные наноразмерные металлсодержащие наночастицы на биметаллические.

В ИХР РАН в течение длительного времени проводятся исследования процессов модифицирования металлсодержащими наночастицами полипропиленовых нитей на стадии их формования из расплава. В частности, показано, что иммобилизация малых количеств наноразмерных железо-, марганец-, медь-, серебросодержащих и других металлсодержащих наночастиц *d*-элементов в объеме комплексной текстильной полипропиленовой нити обеспечивает повышение ее прочности, снижение

поверхностного электрического сопротивления, придание барьерных антимикробных свойств [11-13].

Наночастицы, используемые в качестве добавок в расплав при формовании термопластичных нитей, должны отвечать достаточно жестким требованиям, предъявляемым к наполнителям: обладать высокой термостойкостью, не выделять низкомолекулярных газообразных веществ при нагреве до температур, близких к температуре плавления полимера. При использовании наночастиц в качестве наполнителей очень важно, чтобы они не образовывали агломераты, т.к. даже небольшое их наличие в структуре материала приводит к появлению внутренних напряжений, что снижает его прочность. Образование крупных агломератов делает формование нитей из расплава невозможным. Для того чтобы избежать агрегирования наночастиц, необходимо использовать их в стабилизированном состоянии. В работах, проводимых в ИХР РАН, применялись два метода стабилизации наночастиц – классический, заключающийся в обработке их поверхностно-активными веществами [14, 15] и нетривиальный, представляющий собой иммобилизацию в процессе синтеза полиэтилена низкой плотности (ПЭ) [16, 17]. В первом случае наблюдается образование некоторого количества агломератов, тогда как при втором варианте стабилизации наночастиц агломераты не образуются. В настоящей работе применялись биметаллические наночастицы медь-серебро, стабилизированные в объеме полиэтилена низкой плотности (далее НЧМС ПЭ), синтезированные в ФИЦ ХФ РАН.

Цель работы заключалась в получении из расплава комплексных полипропиленовых текстильных нитей, модифицированных стабилизированными полиэтиленом низкой плотности биметаллическими наночастицами, и изучение влияния этих частиц на структуру и основные характеристики нитей.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

НЧМС ПЭ были получены в ФИЦ ХФ РАН полиольным методом. Нитрат меди, нитрат серебра и гидроксид натрия (мольное соотношение 1 : 0,2 : 3) по отдельности растворяли в глицерине. Раствор нитрата меди тщательно перемешивали с раствором гидроксида натрия, пока раствор не приобретет темно-коричневый цвет (около 30 мин). Полученный раствор охлаждали до комнатной температуры.

Далее 50 мл раствора нитрата серебра медленно вводили в коллоидный раствор наночастиц

меди. Синтезированные биметаллические наночастицы центрифугировали, промывали этанолом и затем сушили при 60 °С.

Размер и форма синтезированных наночастиц определялась на просвечивающем электронном микроскопе (ПЭМ) JEM-1011 (JEOL, Япония), с ускоряющим напряжением 80 кВ. Полученные частицы медь-серебро относились к типу «ядро-оболочка», имели сферическую форму, их размер не превышал 20 нм (рис. 1).

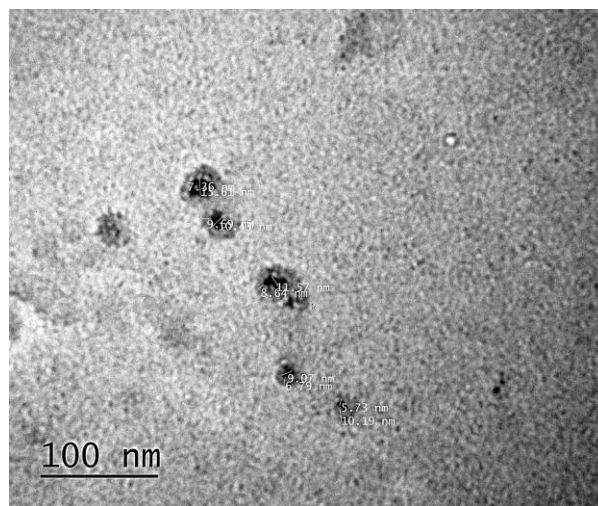


Рис. 1. Изображения ПЭМ сферических частиц медь-серебро типа «ядро-оболочка»

Fig. 1. TEM images of spherical copper-silver core-shell particles

Синтезированные биметаллические наночастицы стабилизировали полиэтиленом низкой плотности путем их введения в расплав полимера в одношнековом экструдере таким образом, чтобы концентрация наночастиц в полимерной матрице составляла от 1 до 5 мас. %. Сформированные композиционные наполнители (КН НЧМС ПЭ) использовались в виде высокодисперсного порошка.

Модифицированные полипропиленовые (ПП) нити формовали на лабораторном стенде СФПВ-1. Ориентационное вытягивание свежесформованных ПП нитей осуществляли на стенде для ориентации синтетических волокон ОСВ-1. Стенды позволяют имитировать условия производственных процессов формования нитей из расплава и их ориентационного вытягивания. Фотографии стендов представлены в работе [11], схемы – в работе [18]. Для получения ПП комплексных нитей с НЧМС, использовалась следующая методика: на 200 г гранул ПП (Бален 01030) наносили парафиновое масло 2 г (1 мас. %), затем добавляли КН НЧМС ПЭ (до 2,5 мас. % НЧМС). Приготовленную смесь тщательно перемешивали, после чего загружали в

экструдер стенда СФПМ-1. Формование осуществляли при следующих температурах зон экструдера: 120 °С – зона загрузки, 220 °С – зона плавления, 220 °С – зона стабилизации расплава, 200 °С – фильерная зона. Температурные условия были выбраны на основании физико-химических свойств используемого полимера и конструктивных особенностей стенда. Скорость приемно-намоточного устройства (скорость формования) составляла 100 м/мин. Сформованные ПП нити имеют довольно рыхлую ламеллярную структуру и большое удлинение (400-1000%) при невысокой прочности. Поэтому нити подвергали ориентационному вытягиванию на стенде ОСВ-1 при следующих температурах: 120 °С – первый вытягивающий диск, 140 °С – второй вытягивающий диск, 155 °С – термоэлектропластификатор. Скорость вытягивания составляла 15 м/мин, кратность вытягивания нитей варьировалась от 3,5 до 5 и определялась способностью нити к вытягиванию. Были получены комплексные нити, состоящие из 24 филаментов.

Состояние поверхности элементарных нитей (филаментов) исследовали на оптическом микроскопе (Биомед, Россия) с цифровой камерой (1,3 Мп) и сканирующем электронном микроскопе Quattro S (Thermo Fisher Scientific, Нидерланды).

Спектроскопию нитей проводили на Рамановском конфокальном лазерном микроскопе Confotec NR500 (Sol Instruments, Белоруссия).

Основные 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).

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). Исследования проводили на биологических культурах: *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. Стандартную навеску нити ($1,0 \pm 0,1$ г) помещали в физиологический раствор, в который введено определенное количество колоний микроорганизмов ($1,5 - 3,0 \cdot 10^8$ КОЕ/мл) в виде суспензии. Пробирки при постоянном встряхивании оставляли при комнатной температуре в течение 24 ч. Коли-

чество содержащихся в растворе колоний биологических культур определяли по изменению коэффициента пропускания раствора (контрольный образец – коэффициент пропускания 100%), который определялся мутностью раствора, зависящей от количества содержащихся в нем колоний.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Свойства нитей, полученных с использованием наполнителя, будут в значительной степени зависеть от равномерности распределения наполнителя в них. О равномерности распределения КН НЧМС ПЭ в нити судили по результатам оптической, просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии. На рис. 2 представлены микрофотографии филамента ориентированной нити, содержащей 5% КН НЧМС ПЭ.

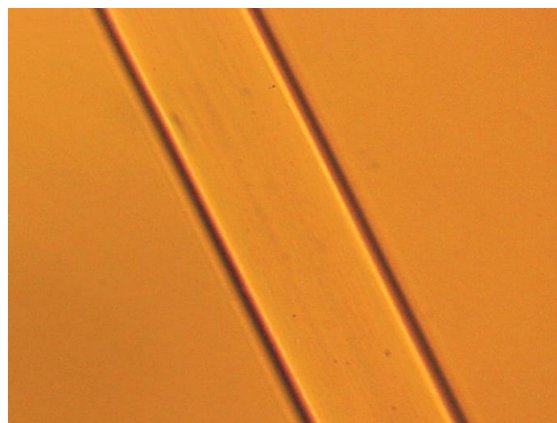


Рис. 2. Микрофотографии ориентированных ПП филаментов линейной плотности 1,25 текс, содержащих 5% стабилизированных полиэтиленом наночастиц медь-серебро. Метод оптической микроскопии. Увеличение 400 раз

Fig. 2. Micrographs of oriented PP filaments of linear density 1.25 tex containing 5% CF NPCPS PE. Optical microscopy. Magnification 400x

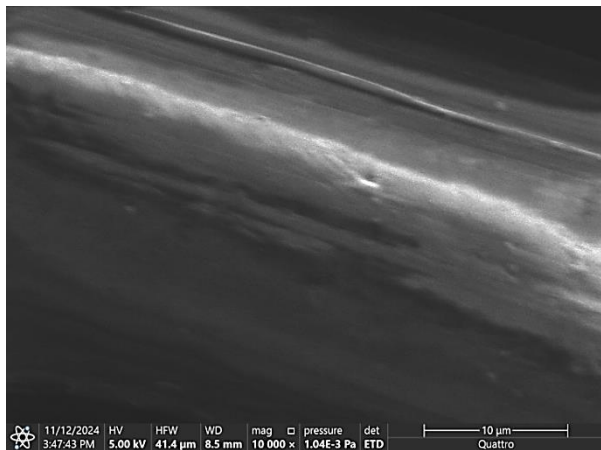
КН НЧМС ПЭ представляет собой порошок темно-серого цвета. При наличии внутри филамента агрегированных частиц порошка они были бы хорошо заметны. Представленный на рис. 2 филамент абсолютно прозрачен и не имеет видимых включений. Следовательно, модифицирующая добавка хорошо диспергирована внутри полипропиленовой нити.

О морфологии поверхности ПП филаментов, модифицированных КН НЧМС ПЭ, судили по данным сканирующей электронной микроскопии. Изображения, полученные этим методом, представлены на рис. 3.

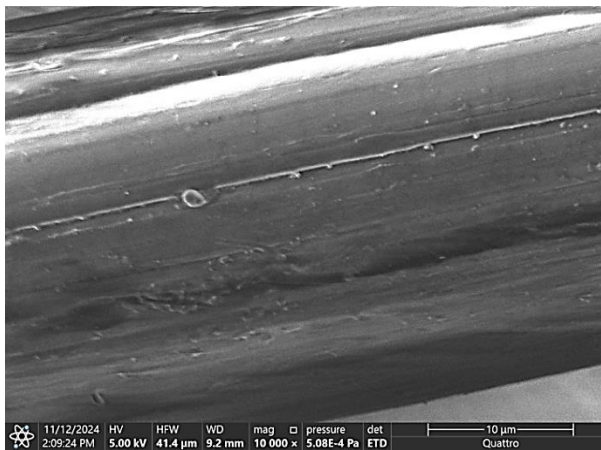
Из рисунка следует, что ПП нить без добавок имеет гладкую ровную поверхность (рис. 3а),

тогда как поверхность филамента, содержащего КН НЧМС ПЭ (рис. 3б), характеризуется наличием выпуклостей и впадин, которые могут образовываться при наличии модификатора в приповерхностном слое.

О присутствии наполнителя в приповерхностном слое ПП филаментов свидетельствуют также спектры комбинационного рассеяния модифицированных ПП филаментов, представленные на рис. 4



а



б

Рис. 3. СЭМ изображения поверхности филаментов ПП нити линейной плотности 1,25 текс: а) немодифицированной; б) содержащей 5% КН НЧМС ПЭ. Увеличение 10000 раз

Fig. 3. SEM images of the linear density PP filaments surface 1.25 tex: a) unmodified; б) containing 5% CF NPCPS PE. Magnification 10000 times

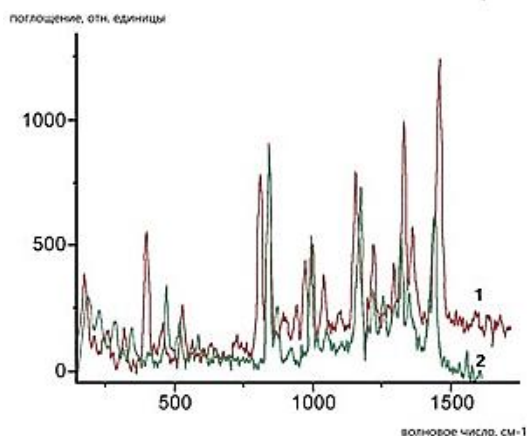


Рис. 4. Спектры комбинационного рассеяния ПП филаментов:

1 – немодифицированного; 2 – содержащего 5% КН НЧМС ПЭ
Fig. 4. Raman spectra of PP filaments: 1 – unmodified; 2 – containing 5% CF NPCPS PE

Видно, что на спектрах модифицированных филаментов появляется ряд четко выраженных дополнительных полос поглощения. В частности, фиксируются четыре полосы в области от 370 до 590 см^{-1} , характерные для наночастиц серебра и меди [19, 20].

Таким образом, на основании данных оптической микроскопии можно констатировать, что КН НЧМС ПЭ распределяются в ПП комплексной текстильной нити равномерно, а данные СЭМ и

спектроскопии комбинационного рассеяния свидетельствуют, что часть наполнителя (не более 10%) локализуется в приповерхностной области филаментов.

Вводимые в нить стабилизированные наночастицы отрицательно не влияют на процесс формирования нитей. Экспериментально установлено, что формирование ПП нити с добавками до 5% КН НЧМС ПЭ протекает равномерно, без увеличения обрывности.

Ранее авторами было установлено [16], что использование для объемного модифицирования полипропиленовой нити композиционного наполнителя с высоким содержанием наночастиц в полиэтиленовой матрице отрицательно сказывается на равномерности его распределения в объеме нити и, как следствие, на ее физико-механических характеристиках. Поэтому была проведена оценка разрывной нагрузки и удлинения комплексных текстильных полипропиленовых нитей, сформированных с использованием КН НЧМС ПЭ, содержащего от 1 до 5% НЧМС в матрице из полиэтилена низкой плотности. Для этого были сформованы ПП нити с варьируемым содержанием НЧМС ПЭ. Разрывные полуцикловые характеристики этих нитей представлены в табл. 1.

Анализ данных, приведенных в табл. 1, показывает, что введение небольших количеств НЧМС

ПЭ в ПП нити вызывает увеличение прочности нитей, особенно значительное при содержании модифицирующих добавок в количестве 0,5%. Причиной повышения прочности полимерных материа-

лов при введении в них небольшого количества наночастиц считается увеличение межфазного взаимодействия, связанного с высокой поверхностной энергией наночастиц [21, 22].

Таблица 1

Разрывные полуволновые характеристики ПП комплексных текстильных нитей, содержащих КМ НЧМС ПЭ

Table 1. Breaking half-cycle characteristics of PP complex textile yarns containing CF NPCS PE

Содержание НЧМС ПЭ	Удельная разрывная нагрузка, сН/текс	Относительное разрывное удлинение, %	Линейная плотность, текс
0	$64,8 \pm 1,9$	$41,3 \pm 1,8$	30
Содержание КМ НЧМС ПЭ – 1%			
0,25	$76,8 \pm 5,3$	$42,7 \pm 1,0$	28
0,5	$71,8 \pm 1,6$	$39,3 \pm 1,5$	26
1,0	$62,1 \pm 1,9$	$46,2 \pm 3,3$	36
2,5	$52,3 \pm 4,5$	$48,8 \pm 3,0$	32
Содержание КМ НЧМС ПЭ – 2%			
0,25	$78,6 \pm 2,3$	$36,7 \pm 2,7$	30
0,5	$77,6 \pm 2,1$	$36,7 \pm 0,7$	34
1,0	$68,5 \pm 1,2$	$45,1 \pm 1,6$	31
2,5	$66,5 \pm 1,5$	$50,3 \pm 3,4$	31
Содержание КМ НЧМС ПЭ – 5%			
0,25	$68,3 \pm 1,3$	$36,5 \pm 1,5$	24
0,5	$83,3 \pm 2,5$	$37,6 \pm 2,5$	26
1,0	$73,6 \pm 2,1$	$36,5 \pm 2,9$	30
2,5	$70,6 \pm 2,0$	$38,1 \pm 3,3$	27

Таблица 2

Ингибирование патогенных микроорганизмов в присутствии ПП нитей, содержащих КН НЧМС ПЭ

Table 2. Inhibition of pathogenic microorganisms in the presence of PP yarns containing CF NPCS PE

Содержание КН НЧМС ПЭ, %	Содержание наночастиц медь-серебро, %	Степень ингибирования роста патогенных культур		
		<i>Escherichia coli</i>	<i>Staphylococcus aureus</i>	<i>Candida albicans</i>
0	-	24	43	37
0,5	0,025	37	79	55
5	0,25	41	81	55

Из результата анализа таблицы также следует, что изменение содержания КН НЧМС в полиэтиленовой матрице от 1 до 5% существенного влияния на физико-механические характеристики нитей не оказывает.

В связи с тем, что введенные в ПП нить НЧМС обладают антимикробной активностью, разумно предположить, что модифицированные ПП нити приобретают способность к подавлению жизнедеятельности патогенных микроорганизмов. Придание ПП волокнистым материалам барьерных антимикробных свойств является очень важной и актуальной задачей, т.к. медицинская одежда из натуральных тканей повсеместно заменяется на одноразовую медицинскую одежду из полипропилена.

Как показано выше, КН НЧМС ПЭ равномерно распределены в объеме каждого филамента комплексной полипропиленовой нити. Часть из них расположена близко к поверхности и прочно с ней связана. Поэтому для изучения микробиологических свойств нити с покрытиями был использован счетный метод, который применяется для оценки биоцидности немигрирующих препаратов [1, 23-25].

Метод основан на подсчете количества колоний микробов, образующихся при 24-ч контакте стандартной навески модифицированного волокнистого материала с физиологическим раствором, в который введено определенное количество колоний микробов в виде суспензии. Для того чтобы из-

бежать ошибок при подсчете колоний микроорганизмов и сократить длительность подсчета, количество образовавшихся колоний определяли нефелометрически (по изменению мутности раствора). Степень ингибирования микроорганизмов оценивали в процентах снижения микробного обсеменения тест-объектов по отношению к аналогичному показателю контрольного тест-объекта (физиологического раствора). Результаты оценки микробиологической активности ПП нити, модифицированной НЧМС ПЭ, приведены в табл. 2.

Анализ данных табл. 2 показывает, что ПП нить, модифицированная КН НЧМС ПЭ, проявляет хорошую антимикробную активность по отношению к грам-положительным микроорганизмам, также имеет место некоторое ингибирующее воздействие на условно патогенные микрогрибы. Поскольку содержание наночастиц металлов в ПП нити очень мало, а интенсивность их антимикробного действия, как известно [1, 23], зависит от концентрации, очевидно, что иммобилизация НЧМС в структуре нити не сказывается отрицательно на их биологической активности. Учитывая характер теста, использованного для оценки антимикробной активности модифицированной нити, следует отметить, что ингибирование жизнедеятельности микроорганизмов реализуется при непосредственном их контакте с нитью. Это означает, что полипропиленовая нить в результате модифицирования приобретает барьерные антимикробные свойства. Поскольку НЧМС ПЭ прочно фиксированы в ПП нитях, отсутствие миграции частиц в окружающую среду и на кожу человека обеспечивает безопасность применения таких материалов для защиты человека от инфекций.

ВЫВОДЫ

Получены из расплава полипропиленовые комплексные текстильные нити, модифицирован-

ные биметаллическими наночастицами медь-серебро, стабилизированными полиэтиленом низкой плотности. Показано, что введение в расплав полипропилена наночастиц медь-серебро, стабилизированных полиэтиленом низкой плотности, не оказывает отрицательного влияния на процесс формирования нитей. Методом оптической микроскопии подтверждено равномерное распределение биметаллических наночастиц медь-серебро в объеме полипропиленовой нити. С помощью сканирующей электронной микроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния показано, что небольшое (до 10%) количество наночастиц локализовано в приповерхностном слое нити.

Изучено влияние модифицирования на физико-механические свойства полипропиленовых комплексных текстильных нитей. Показано, что введение в полипропиленовые нити биметаллических наночастиц в количестве 0,25-0,5 % мас. позволяет на 21,3% увеличить прочность нитей.

Проведена оценка барьерных антимикробных свойств полипропиленовой нити, содержащей НЧМС ПЭ. Показано, что нити обладают хорошими барьерными антимикробными свойствами относительно грам-положительных бактерий *Staphylococcus aureus*, удовлетворительными относительно условно патогенных микрогрибов *Candida Albicans* и не действуют на грам-отрицательные бактерии *Escherichia coli*. Это свидетельствует о перспективности использования стабилизированных полимерами биметаллических наночастиц медь-серебро для модифицирования полипропиленовых нитей и нетканых материалов, предназначенных для изготовления медицинской одежды.

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

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Prorokova N.P., Odintsova O.I., Rumyantseva V.E., Rumyantsev E.V., Kononova V.S. // *Coatings*. 2023. V. 13. 139. DOI: 10.3390/coatings13010139.
2. Одинцова О.И., Владимирцева Е.Л., Козлова О.В., Смирнова С.В., Липина А.А., Петрова Л.С., Ерзунов К.А., Константинова З.А., Зимнуров А.Р., Быков Ф.А., Мельников А.Г. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2023. Т. 66. Вып. 7. С. 173-184. DOI: 10.6060/ivkkt.20236607.6844j.
3. Ерзунов К.А., Одинцова О.И., Трегубов А.В., Ильичева М.Д., Липина А.А. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2023. Т. 66. Вып. 9. С. 89-95. DOI: 10.6060/ivkkt.20236609.6825.

REFERENCES

1. Prorokova N.P., Odintsova O.I., Rumyantseva V.E., Rumyantsev E.V., Kononova V.S. // *Coatings*. 2023. V. 13. 139. DOI: 10.3390/coatings13010139.
2. Odintsova O.I., Vladimirtseva E.L., Kozlova O.V., Smirnova S.V., Lipina A.A., Petrova L.S., Erzunov K.A., Konstantinova Z.A., Zimmurov A.R., Bykov F.A., Melnikov A.G. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 7. P. 173-184. DOI: 10.6060/ivkkt.20236607. 6844j.
3. Erzunov K.A., Odintsova O.I., Tregubov A.V., Ilyicheva M.D., Lipina A.A. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 9. P. 89-95. DOI: 10.6060/ivkkt.20236609.6825.

4. Walther A., Müller A.H.E. // *Chem. Rev.* 2013. V. 113. N 7. P. 5194-5261. DOI: 10.1021/cr300089t.
5. Dastjerdi R., Montazer M. // *Colloids Surf. B: Biointerfaces*. 2010. V. 79. N 1. P. 5-8. DOI: 10.1016/j.colsurfb.2010.03.029.
6. Zille A., Almeida L., Amorim T., Carneiro N., Esteves M.F., Silva C.J., Souto A.P. // *Mater. Res. Express*. 2014. V. 1. N 3. P. 032003. DOI: 10.1088/2053-1591/1/3/032003.
7. Дымникова Н.С., Ерохина Е.В., Морыганов А.П. // *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва)*. 2022. Т. LXVI. № 4. С. 6-13. DOI: 10.6060/rcj.2022664.1.
8. Дымникова Н.С., Ерохина Е.В., Кузнецов О.Ю. // *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва)*. 2024. Т. LXVIII. № 2. С. 3-12. DOI: 10.6060/RCJ.2024682.1.
9. Кудрявцева Е.В., Буринская А.А., Аитова А.Н. // *Химические волокна*. 2023. № 6. С. 37-44.
10. Кудрявцева Е.В., Буринская А.А. // *Известия вузов. Технология текстильной промышленности*. 2022. № 6 (402). С. 106-116. DOI 10.47367/0021-3497_2022_6_106.
11. Пророкова Н.П., Вавилова С.Ю., Бирюкова М.И., Юрков Г.Ю., Бузник В.М. // *Российские нанотехнологии*. 2014. Т. 9. № 9-10. С. 21-27.
12. Пророкова Н.П., Вавилова С.Ю., Кузнецов О.Ю., Бузник В.М. // *Российские нанотехнологии*. 2015. Т. 10. № 9-10. С. 50-57.
13. Юрков Г.Ю., Пророкова Н.П., Козинкин А.В., Вавилова С.Ю., Солодилов В.И., Максимов А.В., Власенко В.Г., Кириллов В.Е., Бузник В.М. // *Механика композитных материалов*. 2022. Т. 58. № 5. С. 1011-1030. DOI: 10.22364/mkm.58.5.09.
14. Prorokova N., Vavilova S. // *Coatings*. 2021. V. 11. 830. DOI: 10.3390/coatings11070830.
15. Пророкова Н.П., Вавилова С.Ю., Бузник В.М. // *Химическая технология*. 2020. Т. 21. №9. С. 409-417. DOI: 10.31044/1684-5811-2020-21-9-409-417.
16. Пророкова Н.П., Вавилова С.Ю., Бирюкова М.И., Юрков Г.Ю., Бузник В.М. // *Химич. волокна*. 2015. № 5. С. 47-54.
17. Пророкова Н.П., Бузник В.М. // *Рос. хим. ж.* 2015. Т. 59. № 3. С. 52-59.
18. Prorokova N.P., Vavilova S.Y., Bouznik V.M. // *J. Fluorine Chem.* 2017. V. 204. P. 50-58. DOI: 10.1016/j.jfluchem.2017.10.009.
19. Сидоров А.И., Безруков П.А., Нашекин А.В., Никонов Н.В. // *ЖТФ*. 2022. Т. 92. Вып. 9. С. 1377-1381. DOI: 10.21883/JTF.2022.09.52929.91-22.
20. Потапов А.Л., Агабеков В.Е., Белый В.Н. // *ЖЛПС*. 2018. Т. 85. № 2. С. 271-279.
21. Кербер М.Л., Виноградов В.М., Головкин Г.С. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология / под ред. Берлина А.А. СПб.: Профессия. 2014. 592 с.
22. Козлов Г.В. // *Успехи физических наук*. 2015. Т. 185. № 1. С. 35-64. DOI: 10.3367/UFNr.0185.201501c.0035.
23. Ibrahim A., Laquerre J.-É., Forcier P., Deregnaucourt V., Decaens J., Vermeersch O. Antimicrobial Agents for Textiles: Types, Mechanisms and Analysis Standards. In *Textiles for Functional Applications*; Kumar, B., Ed.; IntechOpen, 2021. DOI: 10.5772/intechopen.98397.
24. Diana C., Simona O., Narcisa V. // *Rom. Biotechnol. Lett.* 2010. V. 15. P. 4913-4921.
25. Pinho E., Magalhães L., Henriques M., Oliveira R. // *Ann. Microbial.* 2011. V. 61. P. 493-498. DOI: 10.1007/s13213-010-0163-8.
4. Walther A., Müller A.H.E. // *Chem. Rev.* 2013. V. 113. N 7. P. 5194-5261. DOI: 10.1021/cr300089t.
5. Dastjerdi R., Montazer M. // *Colloids Surf. B: Biointerfaces*. 2010. V. 79. N 1. P. 5-8. DOI: 10.1016/j.colsurfb.2010.03.029.
6. Zille A., Almeida L., Amorim T., Carneiro N., Esteves M.F., Silva C.J., Souto A.P. // *Mater. Res. Express*. 2014. V. 1. N 3. P. 032003. DOI: 10.1088/2053-1591/1/3/032003.
7. Dymnikova N.S., Erokhina E.V., Moryganov A.P. // *Ros. Khim. Zh.* 2022. V. 66. N 4. P. 6-13. DOI: 10.6060/rcj.2022664.1.
8. Dymnikova N.S., Erokhina E.V., Kusnetsov O.Yu. // *Ros. Khim. Zh.* 2024. V. 68. N 2. P. 3-12. DOI: 10.6060/rcj.2024682.1.
9. Kudryavtseva E.V., Burinskaya A.A., Aitova A.N. // *Fibre Chem.* 2024. V. 55. N 6. P. 373-379. DOI: 10.1007/s10692-024-10495-1.
10. Kudryavtseva E.V., Burinskaya A.A. // *Izvestia vstihh utchebnykh zavedenii. Technologia techstilnoi promishlennosti*. 2022. N 6. P. 106-116. DOI: 10.47367/0021-3497_2022_6_106.
11. Prorokova N.P., Vavilova S.Yu., Biryukova M.I., Yurkov G.Yu., Buznik V.M. // *Nanotechnol. Russ.* 2014. V. 9. N 9-10. P. 533-540. DOI: 10.1134/S1995078014050140.
12. Prorokova N.P., Vavilova S.Yu., Kuznetsov O.Yu., Buznik V.M. // *Nanotechnol. Russ.* 2015. V. 10. N 9-10. P. 732-740. DOI: 10.1134/S1995078015050171.
13. Yurkov G.Y., Prorokova N.P., Kozinkin A.V., Vavilova S.Y., Solodilov V.I., Maksimov A.V., Vlasenko V.G., Kirillov V.E., Buznik V.M. // *Mechanics of composite materials*. 2022. V. 58. N 5. P. 705-718. DOI: 10.1007/s11029-022-10061-y.
14. Prorokova N., Vavilova S. // *Coatings*. 2021. V. 11. 830. DOI: 10.3390/coatings11070830.
15. Prorokova N.P., Vavilova S.Y., Bouznik V.M. // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2021. V. 55. N 5. P. 1021-1027. DOI: 10.1134/S0040579521050158.
16. Prorokova N.P., Vavilova S.Yu., Biryukova M.I., Yurkov G.Yu., Buznik V.M. // *Fibre Chem.* 2016. V. 47. N 5. P. 384-388. DOI 10.1007/s10692-016-9698-1.
17. Prorokova N.P., Buznik V.M. // *Rus. J. Gen. Chem.* 2017. V. 87. N 6. P. 1371-1377. DOI: 10.1134/S1070363217060391.
18. Prorokova N.P., Vavilova S.Y., Bouznik V.M. // *J. Fluorine Chem.* 2017. V. 204. P. 50-58. DOI: 10.1016/j.jfluchem.2017.10.009.
19. Sidorov A.I., Bezruchov P.A., Naschokin A.V., Nikanorov N.V. // *Journal of Technical Physics*. 2022. V. 92. N 9. P. 1377-1391. DOI: 10.21883/JTF.2022.09.52929.91-22.
20. Potapov A.L., Agabekov V.E., Belyi V.N. // *J. Appl. Spectrosc.* 2018. V. 85. N 2. P. 287-294. DOI: 10.1007/s10812-018-0646-0.
21. Kerber M.L., Vinogradov V.M., Golovkin G.S. Polymer composite materials: structure, properties, technology. Edited by Berlin A.A. SPb: Professia. 2014. 592 p.
22. Kozlov G.V. // *Advances in Physical Sciences*. V. 185. N 1. P. 35-64. DOI: 10.3367/UFNr.0185.201501c.0035.
23. Ibrahim A., Laquerre J.-É., Forcier P., Deregnaucourt V., Decaens J., Vermeersch O. Antimicrobial Agents for Textiles: Types, Mechanisms and Analysis Standards. In *Textiles for Functional Applications*; Kumar, B., Ed.; IntechOpen, 2021. DOI: 10.5772/intechopen.98397.
24. Diana C., Simona O., Narcisa V. // *Rom. Biotechnol. Lett.* 2010. V. 15. P. 4913-4921.
25. Pinho E., Magalhães L., Henriques M., Oliveira R. // *Ann. Microbial.* 2011. V. 61. P. 493-498. DOI: 10.1007/s13213-010-0163-8 64.

Поступила в редакцию (Received) 09.07.2025

Принята к опубликованию (Accepted) 25.09.2025