

Научный журнал «Костюмология» / Journal of Clothing Science <https://kostumologiya.ru>

2021, №1, Том 6 / 2021, No 1, Vol 6 <https://kostumologiya.ru/issue-1-2021.html>

URL статьи: <https://kostumologiya.ru/PDF/03TLKL121.pdf>

Ссылка для цитирования этой статьи:

Тимошина Ю.А. Влияние высокочастотной плазменной модификации на микрорельеф поверхности синтетических волокон // Научный журнал «Костюмология», 2021 №1, <https://kostumologiya.ru/PDF/03TLKL121.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

For citation:

Timoshina Yu.A. (2021). Influence of high-frequency plasma modification on the surface microrelief of synthetic fibers. *Journal of Clothing Science*, [online] 1(6). Available at: <https://kostumologiya.ru/PDF/03TLKL121.pdf> (in Russian)

УДК 677

ГРНТИ 61.67.31

Тимошина Юлия Александровна

ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», Казань, Россия
Доцент кафедры «Плазмохимических и нанотехнологий высокомолекулярных материалов»

Кандидат технических наук, доцент

E-mail: ybuki@mail.ru

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=745370

Влияние высокочастотной плазменной модификации на микрорельеф поверхности синтетических волокон

Аннотация. Для модификации текстильных материалов различного волокнистого состава широкое применение получили методы модификации с использованием высокочастотных разрядов. В данной работе исследовано влияние параметров модификации высокочастотной плазмой пониженного давления в различных плазмообразующих газах на микрорельеф поверхности синтетических многофиламентных волокон на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена и полиамида. Изменение микрорельефа поверхности синтетических волокнистых материалов оказывает существенное влияние на их трибологические и физико-механические свойства, а регулирование шероховатости поверхности является важным при подготовке поверхности текстильных волокнистых материалов к нанесению покрытий и металлизации. Полученные результаты исследований позволяют сделать вывод, что модификация синтетических волокон на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена и полиамида в высокочастотной плазме аргона, аргона/азота и воздуха приводит к сглаживанию поверхности волокон и формированию более однородной структуры поверхности. Наибольшее сглаживание поверхности сверхвысокомолекулярных полиэтиленовых и полиамидных волокон наблюдается после высокочастотной плазменной модификации в плазмообразующем газе аргоне, что может быть связано с более интенсивными процессами окисления, происходящими на поверхности полимерных материалов при их модификации в высокочастотной плазме аргона/азота и воздуха. Отсутствие явных отличий изменения микрорельефа поверхности синтетических волокон при высокочастотной обработке в разных плазмообразующих газах свидетельствует, что основной вклад в снижение шероховатости вносит физическое воздействие плазмы на модифицируемые полимерные материалы, результатами которого могут являться распыление поверхностного слоя полимера, а также десорбция и испарение с поверхности волокон

компонентов аппретирующих составов и замасливателей. Полученные результаты являются частью диссертационного исследования автора.

Ключевые слова: многофиламентное волокно; сверхвысокомолекулярный полиэтилен; полиамид; микрорельеф поверхности; модификация; плазма; высокочастотный разряд пониженного давления

Введение

Одним из важнейших продуктов современной мировой и отечественной текстильной промышленности являются текстильные материалы на основе синтетических волокон, используемые как для производства одежды и бытовых товаров, так и изделий технического назначения [1]. Производство синтетических текстильных материалов характеризуется доступной сырьевой базой, при этом позволяет выпускать материалы и изделия широкого ассортимента и разнообразного качества.

Среди синтетических волокон в мировом производстве по объему выпуска лидируют полиэфирные, полиамидные и полиолефиновые волокна. Но с увеличением производства и потребления синтетических текстильных волокон из традиционных многотоннажных видов полимеров наблюдается увеличение потребности в функциональных текстильных материалах на их основе. Функциональные текстильные материалы из синтетических волокон являются экономически перспективными для изготовления одежды повышенной комфортности, изделий медицинского назначения, а также изделий технического назначения и сверхпрочных волокнистых композиционных материалов [2]. При этом особый интерес представляют синтетические волокнистые материалы с повышенными эксплуатационными характеристиками, развитой капиллярно-пористой структурой и регулируемыми физико-механическими свойствами, и микрорельефом поверхности [3].

Для получения функциональных материалов на основе синтетических волокон используются передовые методы холстообразования, позволяющие получать как однослойные, так и многослойные тканые, трикотажные и нетканые материалы. Однако, несмотря на высокую технологичность данных методов и возможность получения текстильных материалов с новым уровнем структурной организации, данные подходы в полной мере не исчерпывают потенциал функционализации текстиля на основе синтетических волокон. Поэтому актуальной остается разработка методов химической, физической и электрофизической модификации волокнистых материалов с целью функционализации их поверхности.

Химическая модификация волокнистых материалов характеризуется химическими и физико-химическими взаимодействиями, в ходе которых происходит изменение структуры и химического строения волокнообразующих полимеров. Химическая модификация позволяет получать синтетические текстильные материалы с регулируемыми сорбционными свойствами, жесткостью грифа, повышенной прочностью, антистатическими свойствами и др. При этом функционализация текстильных материалов может осуществляться в ходе химической модификации волокнообразующих полимеров, а также химической отделки готовых волокон за счет химического взаимодействия модифицирующего препарата с активными группами на поверхности полимерных волокон [4].

Несмотря на то, что в зависимости от выбранных химических веществ для модификации возможно получать различные эффекты функционализации волокнистых материалов, данные методы отличаются многостадийностью, подразумевают использование и утилизацию химически активных препаратов. Кроме того, химические методы функционализации требуют достаточно сложного подбора модифицирующих составов и условий модификации для каждого конкретного типа волокон и не являются универсальными.

Также для модификации поверхности синтетических волокнистых материалов применяют физические, электрофизические и электрохимические методы, к которым относят термическую и фотохимическую обработки, а также воздействие на модифицируемые материалы ультрафиолетовым излучением, лазером, радиацией и плазмой [5].

Электрофизические и электрохимические методы модификации получили применение для структурирования волокнообразующих полимеров, активации волокнистых подложек и интенсификации химических процессов модификации. Однако большинство из данных методов характеризуются достаточно высокими температурами процессов, которые оказывают деструктирующее воздействие на волокнообразующий полимер, а электрохимические методы в большинстве случаев не являются экологичными, так как требуют использования большого количества химически активных реагентов.

К перспективным методам модификации поверхности полимерных материалов относят плазменные методы модификации, которые исключают использование жидких химических реагентов, являются ресурсоэффективными и позволяют направленно регулировать как поверхностные, так и физико-механические свойства модифицируемых волокнистых материалов.

Модификация текстильных материалов в низкотемпературной плазме тлеющего разряда происходит в зоне положительного столба, поэтому недостатком данного метода модификации является ограниченность контактирующей с плазмой поверхности материала, а также невозможность модификации материалов с низкой термостойкостью и низкая устойчивость получаемых эффектов [6].

Плазма коронного разряда получила достаточно широкое применение для получения электретов на основе текстильных материалов. Но процессы ионизации в коронном разряде происходят только вблизи коронирующего электрода, а не по всей длине между электродами, поэтому для модификации материалов используется ограниченная по площади зона, характеризующаяся высокой напряженностью [7].

Методы модификации текстильных материалов с использованием плазмы искрового, барьерного и дугового разряда не получили широкого практического применения. Модификация плазмой барьерного разряда отличается повышенной энергоемкостью, а получаемые эффекты на волокнистых материалах ниже аналогичных при применении плазмы тлеющего и высокочастотных разрядов [8]. Использование искрового разряда для обработки полимерных материалов приводит к значительному ухудшению их физико-механических характеристик и характеризуется большей продолжительностью процессов модификации по сравнению с другими типами разрядов [9].

При разработке современных текстильных материалов интерес представляют технологии, позволяющие придавать волокнистым материал функциональные характеристики, при этом не ухудшая комплекса их эксплуатационных свойств. Кроме того, актуальным является применение технологий, исключающих использование химически активных и токсичных реагентов, а также обладающих высоким потенциалом интегрируемости и масштабируемости на существующих производствах.

Для модификации текстильных материалов различного волокнистого состава широкое применение получили методы с использованием высокочастотных (ВЧ) разрядов [10–12]. Использование плазмы ВЧ разряда пониженного давления позволяет модифицировать синтетические текстильные материалы из основных многотоннажных видов волокнообразующих полимеров, является экологичной и ресурсосберегающей технологией, позволяющей регулировать сорбционные, адгезионные и прочностные свойства волокнистых материалов, а также микрорельеф поверхности. Кроме того, ВЧ плазменные методы

модификации могут применяться как самостоятельно, так и в совокупности с другими методами модификации для функционализации поверхности однослойных и многослойных материалов различной пространственной структуры.

Изменение микрорельефа поверхности синтетических волокнистых материалов оказывает существенное влияние на их трибологические и физико-механические свойства, а регулирование шероховатости поверхности является важным при подготовке поверхности текстильных волокнистых материалов к нанесению покрытий и металлизации. Так при магнетронном осаждении покрытий на текстильные подложки необходимым является обеспечение высокой адгезии напыляемого покрытия к поверхности волокон. Для повышения адгезии используется пропитка текстиля химическими связующими, но это препятствует получению текстильных материалов с хорошей эластичностью и повышает их жесткость. Поэтому для получения покрытий высокой равномерности перспективно использование ВЧ плазменных методов модификации для предварительной очистки и активации поверхности волокнистых материалов, повышения адгезионного взаимодействия, а также регулирования микрорельефа их поверхности.

Целью данной работы является исследование влияния параметров модификации ВЧ плазмой пониженного давления в различных плазмообразующих газах на микрорельеф поверхности синтетических многофиламентных волокон. Полученные результаты являются частью диссертационного исследования автора.

Методы

В качестве объектов исследования выбраны многофиламентные волокна технического назначения на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) и полиамида (ПА). ВЧ плазменная модификация образцов СВМПЭ и ПА волокон осуществлялась на экспериментальной плазменной установке высокочастотного емкостного разряда пониженного давления.

Для оценки влияния режимов ВЧ плазменной модификации на микрорельеф поверхности синтетических волокон варьировали мощность разряда $W_p = 0,6-2,0$ кВт, продолжительность обработки $\tau = 3-10$ мин., давление в вакуумной камере $P = 10-30$ Па, расход плазмообразующего газа $G = 0,01-0,04$ г/с, в качестве плазмообразующих газов использовали воздух, аргон, и смесь газов аргона и азота в соотношении 70/30, соответственно.

Исследование поверхности синтетических волокон проводили методом конфокальной лазерной сканирующей микроскопии с помощью микроскопа Olympus OLS LEXT 4000 (Япония). Для оценки влияния ВЧ плазменной модификации на показатели шероховатости поверхности синтетических материалов определяли среднюю арифметическую шероховатость (R_a) и шероховатость поверхности по выбранным десяти максимальным высотам и впадинам (R_z).

Результаты

Влияние режимов ВЧ плазменной модификации на значения параметров шероховатости многофиламентных СВМПЭ и ПА волокон представлено в таблице 1. За контрольные образцы приняты СВМПЭ и ПА волокна без ВЧ плазменной модификации.

Таблица 1

Изменения параметров шероховатости R_a и R_z поверхности СВМПЭ и ПА волокон от режима ВЧ плазменной модификации

Режим ВЧ плазменной модификации	СВМПЭ		ПА	
	R_a , мкм	R_z , мкм	R_a , мкм	R_z , мкм
Контрольный образец	0,074	0,425	0,059	0,319
$W_p = 0,6$ кВт, $\tau = 3$ мин., $P = 30$ Па, $G = 0,04$ г/с, аргон	0,070	0,411	0,054	0,292
$W_p = 1,3$ кВт, $\tau = 5$ мин., $P = 30$ Па, $G = 0,04$ г/с, аргон	0,064	0,387	0,051	0,271
$W_p = 2$ кВт, $\tau = 10$ мин., $P = 30$ Па, $G = 0,04$ г/с, аргон	0,055	0,341	0,042	0,229
$W_p = 0,6$ кВт, $\tau = 3$ мин., $P = 30$ Па, $G = 0,04$ г/с, аргон/азот	0,071	0,419	0,057	0,310
$W_p = 1,3$ кВт, $\tau = 5$ мин., $P = 30$ Па, $G = 0,04$ г/с, аргон/азот	0,066	0,393	0,053	0,279
$W_p = 2$ кВт, $\tau = 10$ мин., $P = 30$ Па, $G = 0,04$ г/с, аргон/азот	0,056	0,350	0,045	0,235
$W_p = 0,6$ кВт, $\tau = 3$ мин., $P = 30$ Па, $G = 0,04$ г/с, воздух	0,072	0,421	0,057	0,315
$W_p = 1,3$ кВт, $\tau = 5$ мин., $P = 30$ Па, $G = 0,04$ г/с, воздух	0,068	0,395	0,055	0,282
$W_p = 2$ кВт, $\tau = 10$ мин., $P = 30$ Па, $G = 0,04$ г/с, воздух	0,062	0,370	0,047	0,257

Составлено автором

Результаты конфокальной лазерной сканирующей микроскопии (КЛСМ) поверхности СВМПЭ и ПА волокон до и после ВЧ плазменной модификации в режиме $W_p = 2,0$ кВт, $\tau = 10$ мин., $P = 30$ Па, $G_{Ar} = 0,04$ г/с представлены на рисунке 1 и 2.



Рисунок 1. КЛСМ изображения поверхности образцов СВМПЭ волокон до (а) и после (б) ВЧ плазменной модификации ($\times 1000$)



Рисунок 2. КЛСМ изображения поверхности образцов ПА волокон до (а) и после (б) ВЧ плазменной модификации ($\times 500$)

Анализ полученных результатов исследований позволяет сделать вывод, что независимо от используемого плазмообразующего газа ВЧ плазменная модификация образцов СВМПЭ и ПА волокон приводит к сглаживанию микрорельефа их поверхности, при этом наибольшее снижение показателей шероховатости поверхности наблюдается после ВЧ плазменной

модификации волокон в наиболее интенсивном режиме ($W_p = 2$ кВт, $\tau = 10$ мин., $P = 30$ Па, $G = 0,04$ г/с). После обработки в данном режиме наблюдается снижение показателя R_a для ПА волокон на 20–29 %, для СВМПЭ – на 19–26 %; шероховатость поверхности по выбранным десяти максимальным высотам и впадинам R_z для ПА волокон снижается на 19–28 %, для СВМПЭ – на 13–20 % по сравнению с контрольными образцами. Представленные КЛСМ изображения также свидетельствуют, что ВЧ плазменная модификация синтетических волокон на основе СВМПЭ и ПА приводит к сглаживанию поверхности волокон и формированию более однородной структуры поверхности.

Наибольшее снижение параметров шероховатости поверхности СВМПЭ и ПА волокон наблюдается после ВЧ плазменной модификации при продолжительности ВЧ плазменной модификации 10 мин и мощности разряда 2 кВт в плазмообразующем газе аргоне. Это может быть связано с тем, что при обработке в ВЧ плазме аргона/азота и воздуха на поверхности полимерных материалов происходят более интенсивные процессы окисления, нежели в инертном газе аргоне. А при более низкой интенсивности ВЧ плазменной модификации деструкция и частичная деструкция поверхностного слоя модифицируемых полимерных материалов происходит в меньшей степени, что объясняется меньшей суммарной энергией ионов, бомбардирующих поверхность обрабатываемых образцов. При меньшей продолжительности воздействия и энергии ионов не происходит распыление поверхностного слоя, но возможны процессы десорбции и испарения аппретирующих составов и замасливателей, которые чаще всего являются низкомолекулярными соединениями и наносятся на поверхность текстильных материалов на стадии отделки.

Выводы

В ходе ВЧ плазменной модификации происходит ряд физических и химических взаимодействий активных частиц плазмы с поверхностью модифицируемого материала. Отсутствие явных отличий изменения микрорельефа поверхности синтетических волокон при ВЧ обработке в разных плазмообразующих газах свидетельствует, что основной вклад в снижение шероховатости вносит физическое воздействие плазмы на модифицируемые полимерные материалы, результатами которого в зависимости от интенсивности плазменной модификации могут являться распыление поверхностного слоя полимера, а также десорбция и испарение с поверхности волокон компонентов аппретирующих составов и замасливателей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гришанова И.А. Технический текстиль как перспективное направление развития конкурентоспособной промышленности Татарстана / И.А. Гришанова, Л.Н. Абуталипова // Вестник технологического университета. – 2016. – Т. 19, № 17. – С. 84–87. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27193218> (дата обращения: 11.01.2021).
2. Ибрагимова Н.У. Стратегический анализ текстильной и швейной промышленности России и перспективы развития отрасли / Н.У. Ибрагимова, Р.А. Нигматуллина, З.Р. Габитова // Экономика и предпринимательство. – 2015. – № 11–1. – С. 388–395. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25061573> (дата обращения: 11.01.2021).
3. Переборова Н.В. Повышение качества продукции текстильной и легкой промышленности на основе внедрения информационных технологий в научные исследования / Н.В. Переборова // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Естественные и

- технические науки. – 2015. – № 4. – С. 60–66. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25751232> (дата обращения: 11.01.2021).
4. Буринский С.В. Научные основы технологии и интенсификации процессов химической модификации волокон / С.В. Буринский // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. – 2001. – № 5. – С. 143–150. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38539131> (дата обращения: 11.01.2021).
 5. Ершов, И.П. Модификация синтетических волокон и нитей. Обзор / И.П. Ершов, Е.А. Сергеева, Л.А. Зенитова, И.Ш. Абдуллин // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – Т. 15, № 18. – С. 136–143. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18189380> (дата обращения: 11.01.2021).
 6. Таничев М.В. Общие закономерности воздействия тлеющего разряда на волокнистые материалы / М.В. Таничев, М.В. Акулова // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы. – 2019. – № 1–1. – С. 259–263. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41353600> (дата обращения: 11.01.2021).
 7. Гороховатский Ю.А. Электретные свойства полимерных волокнистых материалов на основе полипропилена / Ю.А. Гороховатский, Д.Э. Темнов // Перспективные материалы. – 2006. – № 1. – С. 68–72. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12969179> (дата обращения: 11.01.2021).
 8. Кутепов А.М. Плазменное модифицирование текстильных материалов: перспективы и проблемы / А.М. Кутепов, А.Г. Захаров, А.И. Максимов, В.А. Титов // Российский химический журнал. – 2002. – Т. 47, № 1. – С. 103–115. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19003804> (дата обращения: 11.01.2021).
 9. Сергеева Е.А. Анализ способов модификации волокнистых материалов / Е.А. Сергеева, И.Ш. Абдуллин, Л.А. Зенитова, К.Д. Костина // Вестник Технологического университета. – 2015. – Т. 18, № 20. – С. 164–167. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25036229> (дата обращения: 11.01.2021).
 10. Timoshina Y.A. Surface activation of polyamide fibers by radio-frequency capacitive plasma for application of functional coatings / Y.A. Timoshina, E.F. Voznesensky, E.S. Tskhay, V.A. Sysoev, I.V. Krasina, G.N. Kulevtsov. – DOI 10.1088/1742-6596/1328/1/012084 // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – V. 1328 – P. 012084. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1328/1/012084> (дата обращения: 11.01.2021).
 11. Timoshina Y.A. Influence of plasma modification on free surface energy of synthetic fibrous materials / Y.A. Timoshina, E.F. Voznesensky, A.E. Karnoukhov, I.V. Krasina, G.R. Rakhmatullina, E.A. Pankova, R.R. Shagivalieva. – DOI 10.1088/1742-6596/1588/1/012052 // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – V. 1588 – P. 012052. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1588/1/012052> (дата обращения: 11.01.2021).
 12. Timoshina Y.A. Modification of textile materials with nanoparticles using low-pressure high-frequency plasma / Y.A. Timoshina, A.V. Trofimov, I.S. Miftakhov, E.F. Voznesensky. – DOI 10.1134/S1995078018060101 // Российские нанотехнологии. – 2018. – Т. 13, № 11–12. – С. 561–564. – URL: https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.springer-doi-10_1134-S1995078018060101 (дата обращения: 11.01.2021).

Timoshina Yuliya Alexandrovna

Kazan national research technological university, Kazan, Russia

E-mail: ybuki@mail.ru

РИИЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=745370

Influence of high-frequency plasma modification on the surface microrelief of synthetic fibers

Abstract. Modification methods using high-frequency discharges are widely used to modify textile materials of various fibrous composition. In this work, the influence of the parameters of modification by high-frequency plasma of reduced pressure in various plasma-forming gases on the surface microrelief of synthetic multifilament fibers based on ultra-high molecular weight polyethylene and polyamide is investigated. A change in the microrelief of the surface of synthetic fibrous materials has a significant effect on their tribological and physicomechanical properties, and regulation of the surface roughness is important in preparing the surface of textile fibrous materials for coating and metallization. The obtained research results allow us to conclude that the modification of synthetic fibers based on ultra-high molecular weight polyethylene and polyamide in high-frequency plasma of argon, argon/nitrogen and air leads to smoothing of the fiber surface and the formation of a more uniform surface structure. The greatest smoothing of the surface of ultra-high molecular weight polyethylene and polyamide fibers is observed after high-frequency plasma modification in a plasma-forming argon gas, which can be associated with more intense oxidation processes occurring on the surface of polymer materials during their modification in high-frequency argon/nitrogen and air plasma. The absence of obvious differences in the change in the microrelief of the surface of synthetic fibers during high-frequency treatment in different plasma-forming gases indicates that the main contribution to the decrease in roughness is made by the physical effect of plasma on the modified polymer materials, the results of which can be sputtering of the surface layer of the polymer, as well as desorption and evaporation from the surface of the fibers of the apprets. The results are part of the author's dissertation research.

Keywords: multifilament fiber; ultra-high molecular weight polyethylene; polyamide; surface microrelief; modification; plasma; low-pressure high-frequency discharge

REFERENCES

1. Grishanova I.A. Tekhnicheskiy tekstil' kak perspektivnoe napravlenie razvitiya konkurentosposobnoy promyshlennosti Tatarstana / I.A. Grishanova, L.N. Abutalipova // Vestnik tekhnologicheskogo universiteta. – 2016. – Т. 19, № 17. – S. 84–87. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27193218> (data obrashcheniya: 11.01.2021).
2. Ibragimova N.U. Strategicheskiy analiz tekstil'noy i shveynoy promyshlennosti Rossii i perspektivy razvitiya otrasli / N.U. Ibragimova, R.A. Nigmatullina, Z.R. Gabitova // Ehkonomika i predprinimatel'stvo. – 2015. – № 11–1. – S. 388–395. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25061573> (data obrashcheniya: 11.01.2021).
3. Pereborova N.V. Povyshenie kachestva produktsii tekstil'noy i legkoy promyshlennosti na osnove vnedreniya informatsionnykh tekhnologiy v nauchnye issledovaniya / N.V. Pereborova // Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta tekhnologii i dizayna. Estestvennye i tekhnicheskie nauki. – 2015. – № 4. – S. 60–66. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25751232> (data obrashcheniya: 11.01.2021).

4. Burinskiy S.V. Nauchnye osnovy tekhnologii i intensivatsii protsessov khimicheskoy modifikatsii volokon / S.V. Burinskiy // Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta tekhnologii i dizayna. – 2001. – № 5. – S. 143–150. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38539131> (data obrashcheniya: 11.01.2021).
5. Ershov, I.P. Modifikatsiya sinteticheskikh volokon i nitey. Obzor / I.P. Ershov, E.A. Sergeeva, L.A. Zenitova, I.Sh. Abdullin // Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. – 2012. – T. 15, № 18. – S. 136–143. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18189380> (data obrashcheniya: 11.01.2021).
6. Tanichev M.V. Obshchie zakonomernosti vozdeystviya tleyushchego razryada na voloknistye materialy / M.V. Tanichev, M.V. Akulova // Fizika voloknistykh materialov: struktura, svoystva, naukoemkie tekhnologii i materialy. – 2019. – № 1–1. – S. 259–263. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41353600> (data obrashcheniya: 11.01.2021).
7. Gorokhovatskiy Yu.A. Ehlektretnye svoystva polimernykh voloknistykh materialov na osnove polipropilena / Yu.A. Gorokhovatskiy, D.Eh. Temnov // Perspektivnye materialy. – 2006. – № 1. – S. 68–72. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12969179> (data obrashcheniya: 11.01.2021).
8. Kutepov A.M. Plazmennoe modifitsirovanie tekstil'nykh materialov: perspektivy i problemy / A.M. Kutepov, A.G. Zakharov, A.I. Maksimov, V.A. Titov // Rossiyskiy khimicheskii zhurnal. – 2002. – T. 47, № 1. – S. 103–115. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19003804> (data obrashcheniya: 11.01.2021).
9. Sergeeva E.A. Analiz sposobov modifikatsii voloknistykh materialov / E.A. Sergeeva, I.Sh. Abdullin, L.A. Zenitova, K.D. Kostina // Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta. – 2015. – T. 18, № 20. – S. 164–167. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25036229> (data obrashcheniya: 11.01.2021).
10. Timoshina Y.A. Surface activation of polyamide fibers by radio-frequency capacitive plasma for application of functional coatings / Y.A. Timoshina, E.F. Voznesensky, E.S. Tskhay, V.A. Sysoev, I.V. Krasina, G.N. Kulevtsov. – DOI 10.1088/1742-6596/1328/1/012084 // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – V. 1328 – P. 012084. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1328/1/012084> (data obrashcheniya: 11.01.2021).
11. Timoshina Y.A. Influence of plasma modification on free surface energy of synthetic fibrous materials / Y.A. Timoshina, E.F. Voznesensky, A.E. Karnoukhov, I.V. Krasina, G.R. Rakhmatullina, E.A. Pankova, R.R. Shagivalieva. – DOI 10.1088/1742-6596/1588/1/012052 // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – V. 1588 – P. 012052. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1588/1/012052> (data obrashcheniya: 11.01.2021).
12. Timoshina Y.A. Modification of textile materials with nanoparticles using low-pressure high-frequency plasma / Y.A. Timoshina, A.V. Trofimov, I.S. Miftakhov, E.F. Voznesensky. – DOI 10.1134/S1995078018060101 // Rossiyskie nanotekhnologii. – 2018. – T. 13, № 11–12. – S. 561–564. – URL: https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.springer-doi-10_1134-S1995078018060101 (data obrashcheniya: 11.01.2021).