

РАЗРАБОТКА ДВУХСЛОЙНОГО НАНОВОЛОКНИСТОГО МАТЕРИАЛА С ЧАСТИЦАМИ СЕРЕБРА

DEVELOPMENT OF A TWO-LAYERED NANOFIBROUS MATERIAL WITH SILVER PARTICLES

УДК 677.076.49 : 620.3

И.И. Черников^{1*}, С.Э. Ржеусский², Д.Б. Рыклин¹

¹Витебский государственный технологический университет

²Витебский государственный ордена Дружбы народов медицинский университет

<https://doi.org/10.24412/2079-7958-2023-1-67-76>

I. Chernikau^{1*}, S. Rzeusky², D. Ryklin¹

¹Vitebsk State Technological University

²Vitebsk State Order of Peoples' Friendship Medical University

РЕФЕРАТ

ЭЛЕКТРОФОРМОВАНИЕ, НАНОВОЛОКНИСТЫЕ МАТЕРИАЛЫ, НАНОЧАСТИЦЫ СЕРЕБРА, РАНЕВЫЕ ПОКРЫТИЯ

Целью работы явилось разработка двухслойного нановолокнистого материала медицинского назначения методом электроформования, в котором сочетаются активный (биodeградирующий) и защитный (биоинертный) слои. Осуществлен выбор волокнообразующих полимеров для каждого слоя: полиамид-6 и поливиниловый спирт. Исходя из проведенного анализа литературных источников, в качестве таргет-компонента в активном слое было принято решение использовать наночастицы серебра. Для получения двухслойного нановолокнистого материала были разработаны рецептуры прядильных растворов. Согласно нормам и рекомендациям определена концентрация серебра в итоговом изделии. Выбраны рациональные режимы работы оборудования. Получены изображения структуры двухслойного нановолокнистого материала, анализ которых указывает на наличие небольшого количества веретенообразных дефектов в слое, полученном из раствора поливинилового спирта с частицами серебра. Определены диаметры нановолокон в каждом слое и установлено, что распределение нановолокон по диаметру соответствует логнормальному закону распределения. С учетом выявленных особенностей протекания процесса электроформования и наличия

ABSTRACT

ELECTROSPINNING, NANOFIBROUS MATERIALS, SILVER NANOPARTICLES, WOUND COVERING

The aim of the work is development of a two-layered nanofibrous material for medicine by electroforming where active (biodegrading) and protective (bioinert) layers are combined. Polyamide-6 and polyvinyl alcohol were chosen as fiber-forming polymers for each layer. Based on the analysis of literature sources, it was decided to use silver nanoparticles as a target component in the active layer. Formulation of spinning solutions was developed for obtaining the two-layered nanofibrous material. The concentration of silver in the final product is determined following the standards and recommendations. Based on this, rational modes for electrospinning equipment were chosen. The analysis of images of the two-layered nanofibrous material structure indicates the presence of a small number of spindle-shaped defects in the layer made from a solution of polyvinyl alcohol with silver particles. The diameters of nanofibers in each layer are measured and it is determined that the distribution of nanofibers by diameter corresponds to the lognormal distribution law. Taking into account the identified features of the electrospinning process and the presence of defects in the structure of the material at the next stage of work it is advisable to determine the possibility of the fiber-forming polymer increasing concentration in the spinning solution. The decision on the need and rational way to

* E-mail: chernikov.st@mail.ru (I. Chernikau)

дефектов в структуре материала на следующем этапе работы целесообразно определить возможность увеличения концентрации волокнообразующего полимера в прядильном растворе. Решение о необходимости и рациональном способе корректировки содержания в материале наночастиц серебра будет принято на основании апробации полученного материала в качестве раневого покрытия.

adjust the content of silver nanoparticles in the material will be made on the basis of approbation of the material as a wound covering.

В последние два десятилетия электроформование было признано одним из самых универсальных методов получения материалов различного назначения из микро- и нановолокон. Множество публикаций, посвященных разработкам новых видов нановолокнистых материалов, доказывает, что в настоящее время наблюдается устойчивый интерес к их применению в биоинженерии и медицине.

Нановолокнистые материалы, как лечебное средство, применяются в качестве различных повязок, в которых они выполняют как защитные, так и лечебные функции при повреждениях, например, кожного покрова. При этом в таких изделиях могут сочетаться различные слои: активный (биodeградирующий), непосредственно контактирующий с повреждением и обладающий сорбционными, кровоостанавливающими и заживляющими свойствами, и защитный (биоинертный), обеспечивающий стерильные условия и свободный обмен с окружающей средой [1].

Благодаря крайне малому диаметру нановолокон заметно увеличивается удельная площадь поверхности. Таким образом, нановолокнистые материалы могут имитировать нанофибриллы внеклеточного матрикса, что делает их идеальными для применения в биомедицине и косметологии [2]. С помощью метода электроформования различные лекарства и биологически активные таргет-компоненты могут быть легко инкапсулированы в нановолокна, что позволяет создавать нановолокнистые материалы с заданными свойствами [3].

С конца 20-го века наблюдается особый интерес к использованию серебра в виде ионов и наночастиц (*AgNP*) в медицине и фармации.

Это связано с доказательством факта того, что серебро обладает более мощным антимикробным эффектом, чем некоторые антибиотики, и оказывает губительное действие на штаммы бактерий, устойчивых к ним [4].

Серебро в виде наночастиц обладает выраженным бактерицидным, противогрибковым действием и служит высокоэффективным обеззараживающим средством в отношении патогенных микроорганизмов, вызывающих инфекционные заболевания. Предполагается, что наночастицы и ионы серебра за счет химических и электростатических сил прикрепляются к отрицательно заряженной клеточной стенке микроорганизмов, нарушают ее функции и разрушают структуру. Затем они связываются с биомолекулами и клеточными структурами, замедляя и останавливая процессы транскрипции, трансляции и синтеза белка, нарушая работу антиоксидантных ферментов, что делает клетку беззащитной перед активными формами кислорода и другими свободными радикалами. Это может привести к окислительному стрессу, повреждениям белков и клеточных мембран, что в дальнейшем приводит к гибели бактерий [5–6].

Было установлено, что бактерицидное влияние *AgNP* на грамположительные бактерии является более выраженным, чем на грамотрицательные. Предполагается, что грамотрицательные бактерии более устойчивы к воздействию *AgNP* благодаря наличию наружной мембраны, служащей своеобразным барьером [7]. Наночастицы серебра проявляют антибактериальный эффект даже при низких концентрациях, например, они полностью цитотоксичны для грамотрицательных бактерий *E. Coli* при поверхностной концентрации всего 8 мкг/см^2 . Это может быть

связано с удельной площадью поверхности наночастиц. Более мелкие частицы с большим отношением поверхности к объему обеспечивают более значимый антибактериальный эффект [8].

Благодаря выше перечисленным эффектам, наночастицы серебра находят широкое применение в медицине для лечения и диагностики различных заболеваний. Они используются в хирургии, в частности, для лечения ран, ожогов, повреждений, в составе минимально травматичных, биосовместимых и биоразстворимых антимикробных повязок [9]. В ряде патентов исследователями разработан ряд раневых покрытий на основе тканых и нетканых материалов природного или синтетического происхождения, содержащих наночастицы серебра [10–11]. Китайским ученым Liu Wenbo были разработаны бактерицидные пластыри с *AgNP*, использование которых снижает необходимость употребления большого количества антибиотиков для борьбы с инфекцией при лечении грижи [12].

С учетом перспективности использования нановолокнистых материалов в медицине и доказанной эффективностью частиц серебра в качестве таргет-компонента, обладающего бактерицидным действием, целью данной работы являлась разработка структуры материала, содержащего *AgNP*, и обоснование возможности его получения методом электроформования.

Для создания нового вида раневого покрытия предложена концепция двухслойного нановолокнистого материала [13], в котором сочетаются: активный слой (водорастворимый с активным компонентом) и защитный (биоинертный). В качестве волокнообразующего полимера для получения активного слоя был выбран поливиниловый спирт (ПВС) марки Arkofil. Использование данного полимера обусловлено его водорастворимостью, биосовместимостью с организмом человека и низкой стоимостью [14], а процесс получения нановолокнистых материалов методом электроформования из него хорошо изучен. В качестве полимера для создания защитного слоя выступает низковязкий полиамид-6, так как данный полимер является водонерастворимым и обладает низкой степенью биodeградации, что может быть связано с сильным взаимодействием между молекулярными цепями из-за водородных связей [15].

Разработка материала основывалась на предположении о том, что при контакте активного слоя, состоящего из поливинилового спирта и *AgNP*, с раневой поверхностью будет происходить быстрое растворение ПВС, то есть образование раствора с наночастицами серебра, тем самым активизируется выделение ионов серебра, которые прикрепляются к стенкам бактерий [16]. Наличие защитного слоя в виде тонкой полиамидной пленки позволит реализовать свободный обмен с окружающей средой. Следовательно, благодаря бактерицидным, выраженным противогрибковым и антисептическим действием наночастиц серебра, разрабатываемый нановолокнистый материал может рассматриваться в качестве раневого покрытия для лечения ожогов и повреждений кожного покрова.

Для получения двухслойного нановолокнистого материала были приготовлены два прядильных состава:

- раствор 1: полиамид-6 – 20 %, муравьиная кислота – 80 %.

- раствор 2: 14 % водный раствор ПВС – 80 %, 0,1 % водный раствор *AgNP* – 20 %.

Наночастицы серебра получены методом глюкозного синтеза из нитрата серебра с использованием в качестве стабилизатора поливинилпирролидона. Полноту протекания реакции контролировали путем определения в растворе ионов серебра. Время реакции составило 2,5 часа.

Выбор концентрации серебра в материале осуществлялся на основании анализа информации о его токсических свойствах. Накопление тяжелых металлов, таких как серебро, в организме человека может привести к нежелательным последствиям, например, к гиперпигментации кожи (аргирия). Аргирия представляет собой нарушение пигментации кожного покрова человека, которое вызвано избыточным накоплением меланина в эпидермисе и дерме [17]. Известно, что ПДК серебра в питьевой воде составляет 50 *мкг/л*. Согласно данным различных ученых, суточная норма потребления серебра составляет от 80 до 100 *мкг* [18]. Такое количество серебра при длительном каждодневном употреблении не приводит к значимым последствиям. Следовательно, при разработке нановолокнистого материала данные рекомендации по concentra-

ции серебра не должны быть превышены.

Однако с учетом особенности структуры и способа применения материала можно отметить, что количество серебра, выделяемое из раневого покрытия, будет зависеть от площади поверхности раны или ожога. Таким образом, для лечения ожогов разной степени целесообразна разработка раневых покрытий с различным содержанием таргет-компонента данного вида.

На данном этапе исследований содержание частиц серебра в прядильном растворе осуществлялось следующим образом. При экспериментальной наработке нановолокнистого материала с наночастицами серебра было установлено, что расход прядильного раствора варьируется в диапазоне от 2,5 до 5 *мл/ч*. Нанесение нановолокнистого слоя осуществлялось на подложку в виде антиадгезионной силиконизированной бумаги размером 300–200 *мм*. При наработке активного слоя в течение 15 минут со средним расходом прядильного раствора 4 *мл/ч* содержание наночастиц серебра в нем составит 200 *мкг*. Предварительно предполагается, что для последующего использования получаемый образец материала с нановолокнистым покрытием будет разрезаться на 4 равные части. Следовательно, содержание *AgNP* в готовом изделии составляет 50 *мкг*. Увеличение содержания серебра в материале возможно двумя способами: повышением концентрации активного компонента в прядильном растворе или увеличением времени на наработку материала. При этом использование первого способа требует проведение дополнительных исследований, так

как введение в состав раствора компонента с повышенной электропроводностью существенно изменяет его свойства.

Получение двухслойных нановолокнистых материалов с *AgNP* методом электроформования осуществлялось на лабораторной установке Fluidnatek LE-50 фирмы Bioinicia (Испания). Нанесение нановолокнистых покрытий осуществлялось на подложку при параметрах процесса электроформования, которые представлены в таблице 1.

Стоит отметить, что возможно повышение производительности оборудования за счет увеличения расхода прядильного раствора, однако это приводит к снижению стабильности процесса электроформования, что, в свою очередь, может влиять на морфологию нановолокон и структуру материала [19]. Исходя из анализа результатов работы [13], можно заметить, что расход прядильного раствора из 14 % ПВС с *AgNP* практически в 3 раза выше, чем при электроформовании нановолокнистых материалов из 14 % раствора ПВС без добавок. Такой результат может объясняться тем, что наличие наночастиц серебра сильно повышает электропроводность данного раствора и впоследствии приводит к увеличению производительности оборудования.

Для визуализации структуры двухслойного нановолокнистого материала, полученного методом электроформования, были получены изображения с использованием электронного сканирующего микроскопа LEO 1420 (Carl Zeiss, Германия), которые представлены на рисунках 1 и 2 соответственно.

Таблица 1 – Параметры процесса электроформования

Параметр	Защитный слой	Активный слой
Состав прядильного раствора	20 % раствор полиамида-6	14 % раствор ПВС + 0.1 % раствор AgNP
Расстояние от эмиттера до коллектора, <i>см</i>	10	10
Напряжение на эмиттере, <i>кВ</i>	29	30
Напряжение на коллекторе, <i>кВ</i>	-9	-10
Расход прядильного раствора, <i>мл/ч</i>	0,3	4
Частота вращения коллектора, <i>мин⁻¹</i>	200	200
Время нанесения, <i>мин</i>	60	15

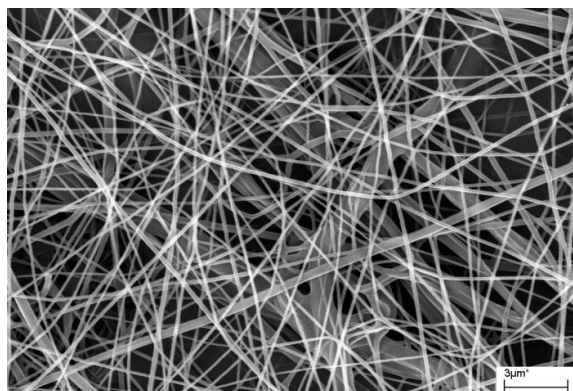
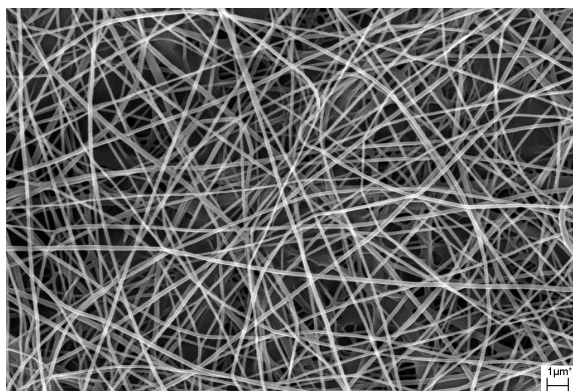


Рисунок 1 – Изображения структуры нановолокнистого слоя из раствора полиамида-6 при увеличении в 10000 раз

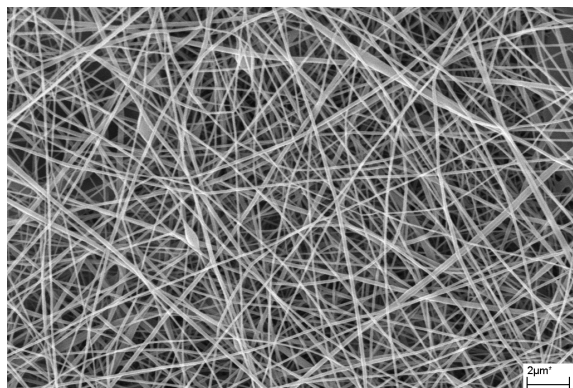
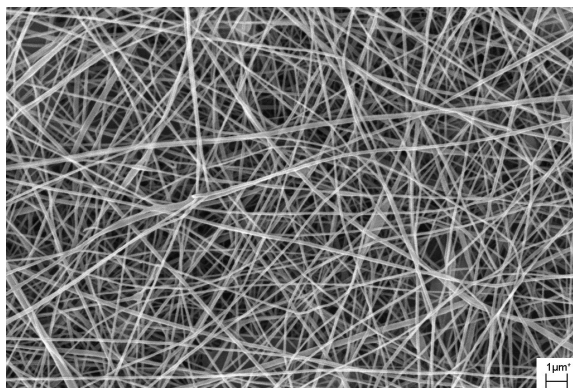


Рисунок 2 – Изображения структуры нановолокнистого слоя из раствора ПВС с **AgNP** при увеличении в 10000 раз

Проанализировав полученные изображения, можно заметить, что сквозь поверхность слоя, полученного из полиамида-6, видны нановолокна находящиеся в активном слое. Это говорит о том, что слой из полиамидных нановолокон имеет незначительную толщину. Полиамидные нановолокна несколько тоньше волокон из ПВС с добавлением частиц серебра и более равномерны по диаметру. В целом, в первом слое не

наблюдается ярко выраженных дефектов. Во втором слое можно заметить наличие незначительного количества веретенообразных дефектов, что может объясняться снижением концентрации волокнообразующего полимера во время процесса электроформования. Дефект носит пороговый характер и зависит от выбора волокнообразующего полимера [19]. Наличие подобных дефектов может объясняться пони-

женной вязкостью раствора. Было установлено, что динамическая вязкость 14%-го раствора ПВС с *AgNP* составляет 323 *мПа · с*, что практически в 4 раза ниже, чем динамическая вязкость чистого 14%-го раствора ПВС без активных добавок, которая составляет 1321 *мПа · с*. Однако стоит отметить, что наличие индивидуальных веретенообразных утолщений практически не влияет на эксплуатационные свойства данного нановолокнистого материала.

Установлено, что распределение волокон по диаметру соответствует логнормальному (рисунки 3 и 4). Ранее была подтверждена гипотеза о том, что если считать процесс расщепления струи стационарным при условии постоянства скорости расщепления струй на всем пути от эмиттера до коллектора, то соответствие распределения логнормальному закону может использоваться в качестве одного из критериев стабильности

процесса электроформования [20]. Таким образом, можно сделать вывод, что введение в состав прядильного раствора наночастиц серебра в указанном количестве не оказало негативного влияния на процесс электроформования.

В таблице 2 представлена характеристика получаемых нановолокон.

Исходя из результатов проделанной работы, можно сделать следующие выводы:

1. Предложена двухслойная структура нановолокнистого материала, содержащего наночастицы серебра, и доказана возможность его получения методом электроформования.

2. С учетом выявленных особенностей протекания процесса электроформования и наличия дефектов в структуре материала на следующем этапе работы целесообразно определить возможность увеличения концентрации волокнообразующего полимера в прядильном растворе.

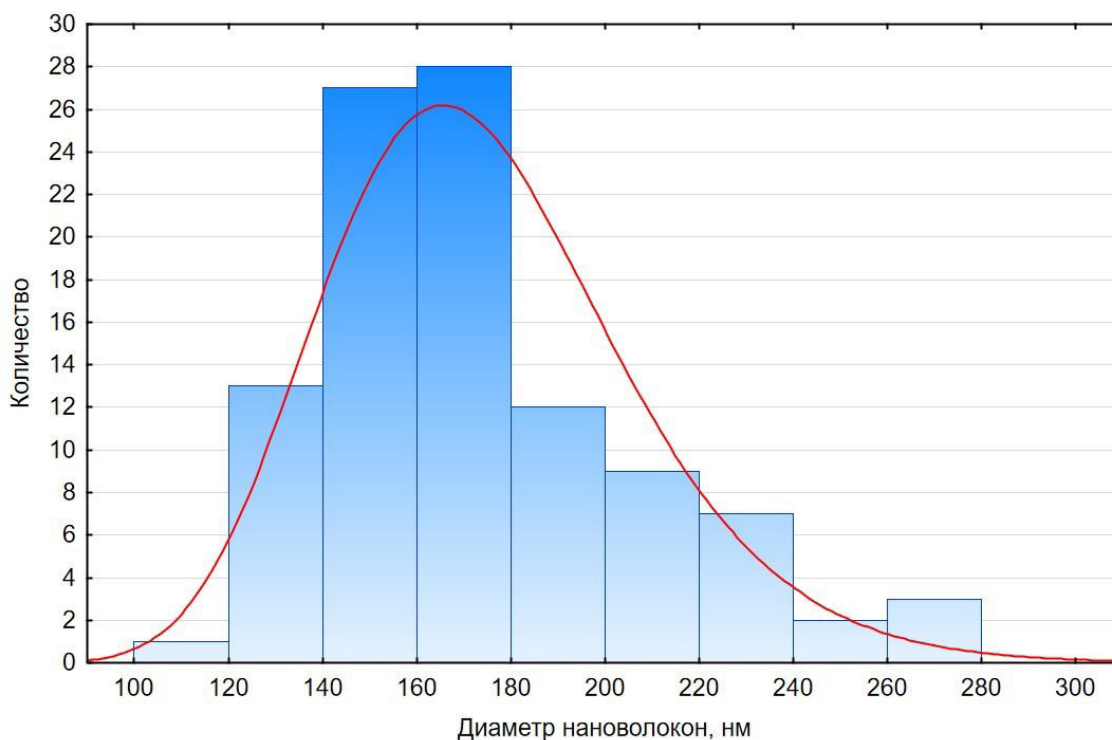


Рисунок 3 – Гистограмма распределения нановолокон по диаметру в слое, полученном из 20 % раствора полиамида-6

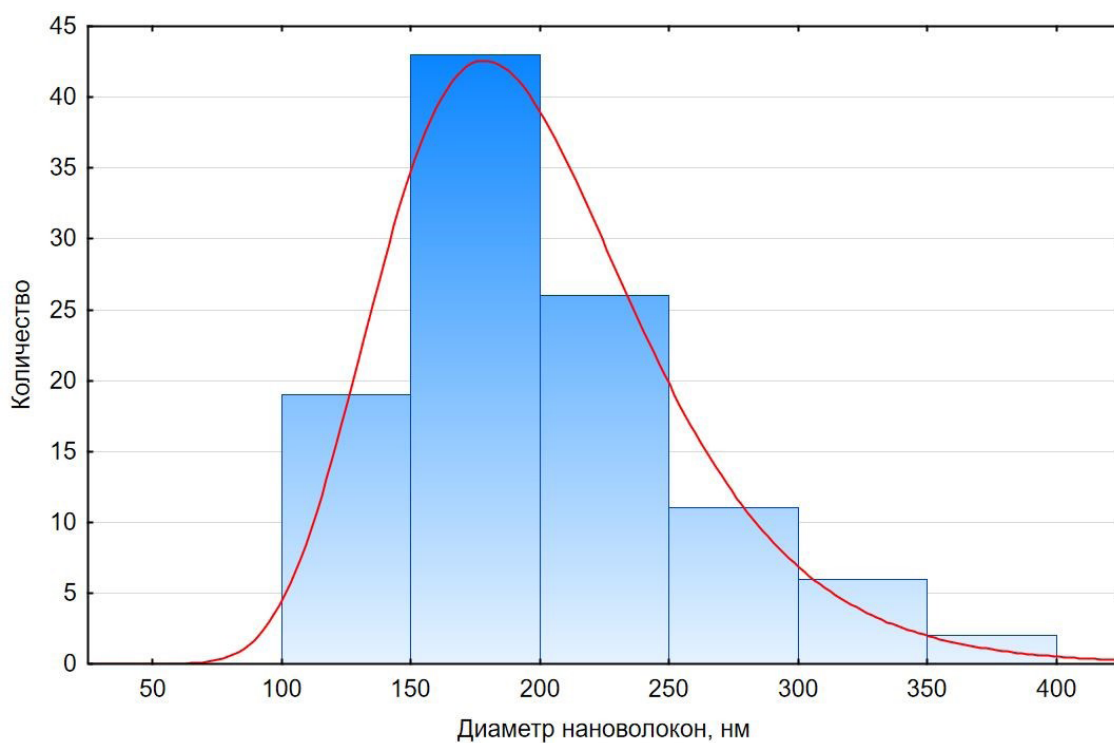


Рисунок 4 – Гистограмма распределения нановолокон по диаметру в слое, полученном из раствора ПВС с AgNP

Таблица 2 – Характеристика получаемых нановолокон

Наименование образца	Средний диаметр волокон, нм	Коэффициент вариации по диаметру волокна, %
20 % р-р полиамида-6 (1 слой)	174	13,3
14 % р-р ПВС с AgNP (2 слой)	199	28,4

3. Решение о необходимости и рациональном способе корректировки содержания в материале наночастиц серебра будет принято на основании апробации полученного материала в качестве раневого покрытия.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Lim, S. H., Mao, H. Q. (2009), Electrospun scaffolds for stem cells engineering, *Advanced Drug Delivery Reviews*, 2009, № 61, pp. 1084–1096.
2. Schiffman, J. D., Schauer, C. L. (2008), A review: Electrospinning of biopolymer nano-fibers and their applications, *Polymer Reviews*, 2008, № 48 (2), pp. 317–352.
3. Luraghi, A., Peri, F., Moroni, L. (2021), Electrospinning for drug delivery applications: A Review, *Journal of Controlled Release*, 2021, № 334, pp. 463–484.
4. Брызгунов, В. С., Липин, В. Н., Матросова, В. Р. (1964), Сравнительная оценка бактерицидных свойств серебряной воды и антибиотиков на чистых культурах микробов и их ассоциациях, *Вестник Казанского медицинского университета*, 1964, № 14, С. 121–122.
5. Lee, S. H., Jun, B. H. (2019), Silver nanoparticles: synthesis and application for nanomedicine, *International Journal of Molecular Science*, 2019, № 20(4), pp. 865.
6. Franci, G., Falanga, A., Galdiero, S., Palomba, L., Rai, M., Morelli, G., Galdiero, M. (2015), Silver nanoparticles as potential antibacterial agents, *Molecules*, 2015, № 20(5), pp. 8856–8874.
7. Габриелян, Л. С., Трчунян, А. А. (2020), Антибактериальные свойства наночастиц серебра и мембранотропные механизмы их действия, *Журнал Белорусского государственного университета. Биология*, 2020, № 3, С. 64–71.
8. Mritunjai, S., Shinjini, S., Prasada, S., Gambhir, I. S. (2008), Nanotechnology in medicine and antibacterial effect of silver nanoparticles, *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures*, 2008, № 3, pp. 115–122.

REFERENCES

1. Lim, S. H., Mao, H. Q. (2009), Electrospun scaffolds for stem cells engineering, *Advanced Drug Delivery Reviews*, 2009, №61, pp. 1084–1096.
2. Schiffman, J. D., Schauer, C. L. (2008), A review: Electrospinning of biopolymer nano-fibers and their applications, *Polymer Reviews*, 2008, № 48 (2), pp. 317–352.
3. Luraghi, A., Peri, F., Moroni, L. (2021), Electrospinning for drug delivery applications: A Review, *Journal of Controlled Release*, 2021, № 334, pp. 463–484.
4. Bryzgunov, V. S., Lipin, V. N., Matrosova, V. R. (1964), Comparative evaluation of bactericidal properties of silver water and antibiotics on pure cultures of microbes and their associations [Svrnitel'naya ocenka baktericidnyh svojstv serebryanoj vody i antibiotikov na chistyh kul'turah mikrobov i ih asociacijah], *Vestnik Kazanskogo medicinskogo universiteta – Vestnik of Kazan medical university*, 1964, № 14, pp. 121–122.
5. Lee, S. H., Jun, B. H. (2019), Silver nanoparticles: synthesis and application for nanomedicine, *International Journal of Molecular Science*, 2019, № 20(4), pp. 865.
6. Franci, G., Falanga, A., Galdiero, S., Palomba, L., Rai, M., Morelli, G., Galdiero, M. (2015), Silver nanoparticles as potential antibacterial agents, *Molecules*, 2015, № 20(5), pp. 8856–8874.
7. Gabrielyan, L. S., Trchunyan, A. A. (2020), Antibacterial properties of silver nanoparticles and membranotropic mechanisms of their action [Antibakterial'nye svojstva nanochastich serebra i membranotropnye mekhanizmy ix dejstviya], *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya – Journal of the Belarusian State University. Biology*, 2020, № 3, pp. 64–71.

9. Баранова, О. А., Пахомов, П. М., Способ получения пленок с наноструктурным серебром, Патент РФ № 2542280.
10. Дробыш, С. В., Волков, А. А., Раневое покрытие, Патент РФ № 2314834.
11. Jinjun, L., Weiyi, S., Qiangbay, L., Nano-silver anti-cancer composition for treating lung cancer as well as preparation method and application thereof, Patent CN № 103933067.
12. Wenbo, L., Nano-silver anti-infection hernia repair patch and preparation method thereof, Patent CN № 103893830.
13. Рыклин, Д. Б., Черников, И. И., Демидова, М. А. (2022), Разработка двухслойного нановолокнистого материала для косметологии, *Материалы докладов международной научно-технической конференции (ICTAI-2022)*, 2022, С. 27–30.
14. Рыклин, Д. Б., Ясинская, Н. Н., Демидова, М. А., Азарченко, В. М., Скобова, Н. В. (2020), Исследование влияния свойств растворов поливинилового спирта на структуру электроформованных материалов, *Вестник Витебского государственного технологического университета*, 2020, № 2(39), С. 130–139.
15. Tokiwa, Y., Calabria, B. P., Ugwu, C. U., Aiba, S. (2009), Biodegradability of Plastics, *International Journal of Molecular Sciences*, 2009, № 10 (9), pp. 3722–3742.
16. Ржеусский, С. Э. (2022), Наночастицы серебра в медицине, *Вестник Витебского государственного медицинского университета*, 2022, № 21(2), С. 15–24.
17. Кривошеев, А. Б., Хван, Л. А., Бобохидзе, Д. Н., Кривошеева, И. А., Морозов, Д. В., Артюшин, В. А. (2018), Генерализованная аргирия, *Российский журнал кожных и венерических болезней*, 2018, № 21(2), С. 101–105.
8. Mritunjai, S., Shinjini, S., Prasada, S., Gambhir, I. S. (2008), Nanotechnology in medicine and antibacterial effect of silver nanoparticles, *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures*, 2008, № 3, pp. 115–122.
9. Baranova, O. A., Pakhomov, P. M., A method for producing films with nanostructured silver [Sposob polucheniya plenok s nanostrukturnym serebrom], Patent RF № 2542280.
10. Drobysch, S. V., Volkov, A. A., Wound coating [Ranevoe pokrytie], Patent RF № 2314834.
11. Jinjun, L., Weiyi, S., Qiangbay, L., Nano-silver anti-cancer composition for treating lung cancer as well as preparation method and application thereof, Patent CN № 103933067.
12. Wenbo, L., Nano-silver anti-infection hernia repair patch and preparation method thereof, Patent CN № 103893830.
13. Ryklin, D. B., Chernikov, I. I., Demidova, M. A. (2022), Development of a two-layer nanofiber material for cosmetology [Razrabotka dvuh-slojnogo nanovolknistogo materiala dlya kosmetologii], *Proceedings of the International Scientific and Technical Conference (ICTAI-2022)* (ICTAI-2022), 2022, pp. 27–30.
14. Ryklin, D. B., Yasinskaya, N. N., Demidova, M. A., Azarchenko, V. M., Skobova, N. V. (2020), Investigation of the effect of the properties of polyvinyl alcohol solutions on the structure of electroformed materials [Issledovanie vliyaniya svojstv rastvorov polivinilovogo spirta na strukturu elektroformovannykh materialov], *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta – Vestnik of the Vitebsk State Technological University*, 2020, № 2(39), pp. 130–139.
15. Tokiwa, Y., Calabria, B. P., Ugwu, C. U., Aiba, S. (2009), Biodegradability of Plastics, *International Journal of Molecular Sciences*, 2009, № 10 (9), pp. 3722–3742.

18. Войнар, А. И. (1962), *Микроэлементы в живой природе*, Москва, Высшая Школа, 94 с.
19. Матвеев, А. Т., Афанасов, И. М. (2010), *Получение нановолокон методом электроформования*, Москва, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, 83 с.
20. Рыклин, Д. Б., Демидова, М. А., Азарченко, В. М., Скродская, К. В. (2021), Обоснование закона распределения нановолокон по диаметру в материалах, полученных методом электроформования, *Известия вузов. Технология текстильной промышленности*, 2021, № 4, С. 121–128.
16. Rzeusskij, S. E. (2022), Silver nanoparticles in medicine [Nanochasticy serebra v medicine], *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo medicinskogo universiteta – Vestnik of Vitebsk State Medical University*, 2022, № 21(2), pp. 15–24.
17. Krivosheev, A. B., Hvan, L. A., Bobohidze, D. N., Krivosheeva, I. A., Morozov, D. V., Artyushin, V. A. (2018), Generalized argyria [Generalizovannaya argiriya], *Rossijskij zhurnal kozhnyh i venericheskikh boleznej – Russian Journal of Skin and Venereal Diseases*, 2018, № 21(2), pp. 101–105.
18. Vojnar, A. I. (1962), *Trace elements in wildlife* [Mikroelementy v zhivoj prirode], Moscow, Higher School, 94 p.
19. Matveev, A. T., Afanasov, I. M. (2010), *Production of nanofibers by electrospinning* [Polucheniye nanovolokon metodom elektroformovaniya], Moscow, State University named after M.V. Lomonosov, 83 p.
20. Ryklin, D. B., Demidova, M. A., Azarchenko, V. M., Skrockaya, K. V. (2021), Substantiation of the law of distribution of nanofibers by diameter in materials by electrospinning, [Obosnovanie zakona raspredeleniya nanovolokon po diametru v materialah, poluchennyh metodom elektroformovaniya], *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti – Proceedings of Higher Educational Institutions. Textile Industry Technology*, 2021, № 4, pp. 121–128.

Статья поступила в редакцию 13. 05. 2023 г.