УДК 677.017.8 : 687.14 DOI: https://doi.org/10.24412/2079-7958-2025-3-65-76

Получение антисептических пленок методом электроформования

М. С. Карнилов[1], Д. Б. Рыклин[1], С. Э. Ржеусский[2]

[1]Витебский государственный технологический университет,
[2]Витебский государственный ордена Дружбы народов медицинский университет,
Республика Беларусь

Аннотация. Одним из актуальных направлений создания новых видов материалов с уникальными свойствами для применения в различных сферах деятельности человека являются нанотехнологии. Статья посвящена разработке антисептических перевязочных материалов, содержащих новые антибактериальные компоненты, методом электроформования. Для достижения поставленной цели в рамках данной работы необходимо было решить следующие задачи осуществлен выбор волокнообразующих полимеров и функциональных добавок для получения нановолокнистых антисептических материалов, определены режимы электроформования при использовании антибактериальных добавок, выявлено влияние антибактериальных добавок на стабильность процесса электроформования и структуру получаемых материалов, оценена антибактериальную активность образцов при добавлении к ним антибактериальных добавок. Для обеспечения антисептического эффекта было предложено использовать антибактериальные добавки, такие как тетраметилендиэтилентетрамин и полигексаметиленгуанидин гидрохлорид. Процесс электроформования нановолокнистого слоя осуществлялся на установке Fluidnatek LE-50. В качестве волокнообразующего полимера был выбран поливиниловый спирт. В результате исследований установлено, что использование предложенных функциональных добавок позволяет придать антибактериальные свойства материалу. Установлено, что полученные образцы нановолокнистых материалов, обладают достаточной антибактериальной активностью, чтобы в условиях лаборатории уверенно подавлять рост патогенных микроорганизмов под собой.

Ключевые слова: электроформование, поливиниловый спирт, тетраметилендиэтилентетрамин, полигексаметиленгуанидин, антибактериальный.

Информация о статье: поступила 11 июня 2025 года.

Статья подготовлена по материалам доклада 58-й Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов, которая состоялась 16–17 апреля 2025 года в учреждении образования «Витебский государственный технологический университет» (Республика Беларусь).

Manufacturing of antiseptic films by electrospinning

Mikhail S. Karnilov[1], Dzmitry B. Ryklin[1], Sergey E. Rzheussky[2]

[1]Vitebsk State Technological University,
[2]Vitebsk State Order of Peoples' Friendship Medical University,
Republic of Belarus

Abstract. Nanotechnology is a current trend in the development of new materials with unique properties for use in various fields of human activity. This article focuses on the development of antiseptic dressings containing new antibacterial components by electrospinning technique. To achieve the stated goal, this study required addressing the following tasks: selecting fiber-forming polymers and functional additives for producing nanofibrous antiseptic materials, determining electrospinning conditions using antibacterial additives, identifying the effect of antibacterial additives on the stability of the electrospinning process and the structure of the resulting materials, and evaluating the antibacterial activity of the nanofibrous samples with the addition of antibacterial additives. To ensure an antiseptic effect, it was proposed to use antibacterial additives such as tetramethylene diethylenetetramine and polyhexamethylene guanidine hydrochloride. The nanofibrous materials was obtaining using a Fluidnatek LE-50 machine. Polyvinyl alcohol was selected as the fiber-forming polymer. The study revealed that the use of offered functional additives can impart antibacterial properties to the material. It was observed that the obtained samples of nanofibrous materials possess sufficient antibacterial activity to reliably

suppress the growth of pathogenic microorganisms under laboratory conditions.
Keywords: electrospinning, polyvinyl alcohol, tetramethylene diethylenetetramine, polyhexamethylene guanidine, antibacterial.
Article info: received June 11, 2025.
The article summarizes the research materials presented at the 58th International Scientific and Technical Conference of Teachers and Students, held on April 16–17, 2025 at Vitebsk State Technological University (Republic of Belarus).

Введение

Применение нанотехнологий в настоящее время относится к наиболее перспективным направлениям в разработке новых материалов с уникальными свойствами, которые могут быть использованы в различных сферах человеческой деятельности. В числе областей применения данных материалов медицина занимает одно из ключевых мест.

Для исследовательских и терапевтических нужд современной медицины активно применяются разнообразные по форме и дисперсному составу металлические, полупроводниковые, полимерные, оксидные, углеродные наноструктурированные материалы, например, наноструктурированные материалы с содержанием частиц серебра, контрастные средства на основе суперпарамагнитных наночастиц оксида железа (Хубутия и др., 2012).

Одной из разновидностей наноструктурированных материалов медицинского назначения являются нановолокнистые материалы, получаемые методом электроформования, сущность которого заключается в получении нановолокон за счет воздействия электрического поля на раствор или расплав полимера (Haider, Haider and Kang, 2018; Stace et. al., 2019; Mehnath et. al., 2020). Электроформование позволяет получать пленки и композиционные материалы, структура и состав которых обеспечивают достижение заданного уровня водо- и паропроницаемости, антибактериальных и антивирусных свойств. В связи с этим в мире наблюдается устойчивый интерес к применению нановолокнистых материалов в биоинженерии и медицине для создания изделий санитарно-гигиенического, косметологического и лечебного назначения, в том числе, для обеспечения доставки лекарств и заживление ран (Wang, 2009). Нановолокнистые материалы, как лечебное средство, применяются в качестве различных покрытий, в которых они выполняют как защитные, так и лечебные функции при повреждениях, например, внутренних органов (Chagas et. al., 2021; Su et. al., 2021; Hermenegildo et. al., 2022).

В ряде патентов исследователями разработан ряд раневых покрытий на основе тканых и нетканых материалов природного или синтетического происхождения, содержащие наночастицы серебра, хлоргексидина гид-рохлорид, антибиотики и т. д. (Миклис, и др., 2020; Liu, 2021). Они показывают хорошую биосовместимость, фармакологическую активность, а по отношению к некоторым из них уже имеется положительный клинический опыт применения.

Однако почти ко всем антимикробным компонентам рано или поздно развивается устойчивость микроорганизмов (Шамина и др., 2020; Решедько и др., 2006). Бактериальные клетки изменяют течение своих биохимических реакций, вырабатывают инактивирующие антибиотики ферменты, утолщают клеточную стенку, совершенствуют системы активного транспорта и т. д. (Абдулкадырова, 2023). Все эти механизмы уменьшают или отменяют активность антимикробных препаратов, которые ранее были высокоэффективными. Антибиотики, широко используемые в 50–60-х годах XX века в современном здравоохранении не используются вовсе. Это заставляет искать новые вещества, обладающие антимикробной активностью, не смотря на широкий ассортимент противомикробных препаратов в аптеках.

Таким образом, актуальной является разработка антисептических перевязочных материалов, содержащих новые антибактериальные компоненты, методом электроформования.

Для достижения поставленной цели в рамках данной работы необходимо было решить следующие задачи:

1. Осуществить выбор волокнообразующих полимеров и функциональных добавок для получения нановолокнистых антисептических материалов.

2. Определить режимы электроформования при использовании антибактериальных добавок.

3. Определить влияние антибактериальных добавок на стабильность процесса электроформования и структуру получаемых материалов.

4. Оценить антибактериальную активность образцов при добавлении к ним антибактериальных добавок.

Методы и средства исследований

Процесс электроформования нановолокнистого слоя осуществлялся на установке Fluidnatek LE-50 (рисунок 1). Для получения разрабатываемого материала была использована подложка из пергаментной силиконизированной бумаги. Данный вид подложки не затрудняет протекание процесса электроформования и, благодаря низкой адгезии, обеспечивает снятие пленки без повреждений.

Подложка фиксировалась на коллекторе – осадительном электроде, на который подавался отрицательный потенциал.

При выборе волокнообразующего полимера для получения нановолокнистых пленок принимались во внимание такие предъявляемые к нему требования, как биосовместимость, биодеградируемость, а также приемлемые механические свойства получаемых материалов: низкая жесткость, достаточная прочность, предотвращающая повреждение пленки при хирургических манипуляциях, а также при воздействии потока крови (Gao et. al., 2021; Pillai et.al., 2021). На основании анализа различных полимеров в качестве основного компонента пленки был выбран поливиниловый спирт (ПВС).

ПВС является биосовместимым полимером, не оказывает токсической нагрузки на организм пациента и не вызывает иммунного ответа, обладает специфическим характером и скоростью растворения, способен выводиться из организма пациента и не накапливается в тканях и органах. Благодаря нетоксичности ПВС применяется в медицине в качестве клеев, пластырей, стерильных салфеток, хирургических нитей, фармацевтических препаратов, для изготовления плазмозаменяющих растворов. ПВС является водорастворимым полимером, в связи с чем широко применяется в инновационной медицине для получения нановолокнистых материалов с высокой скоростью растворения. (Рыклин др., 2024).

ПВС гигроскопичен, растворяется в холодной воде крайне медленно, но при повышенных температурах (около 90 °С) достаточно быстро переходит в раствор. (Николаев, 1979).

Для достижения антисептического эффекта было предложено использовать антибактериальные добавки такие как тетраметилендиэтилентетрамин (ТМДЭТА) и полигексаметиленгуанидин гидрохлорид (ПГМГ).

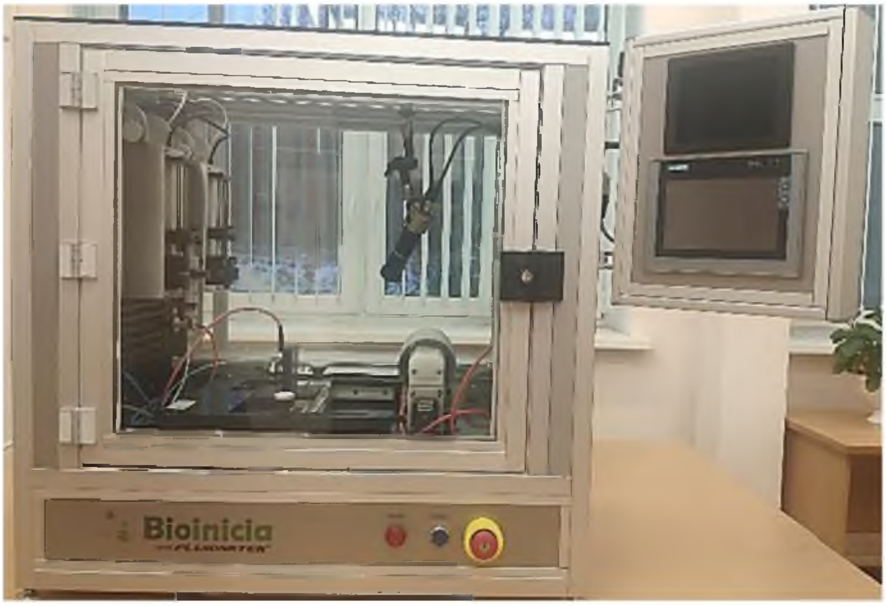


Рисунок 1 – Установка Fluidnatek LE-50

Figure 1 – Electrospinning machine Fluidnatek LE-50

Растворы ТМДЭТА обладают противовирусным, антибактериальным, а также фунгицидным действием, воздействуя в том числе и на устойчивые к воздействию дезинфектантов микроорганизмы. Применение ТМДЭТА в помещениях с животными и людьми также является безопасным (Yu, Baek, Cho, 2019). На обработанной поверхности образует микропленку, тем самым обеспечивая защиту от повторной контаминации на срок не менее 11 месяцев.

ПГМГ гидрохлорид обладает высокой бактерицидной и фунгицидной активностью. Растворы препарата в 0,05%-ой концентрации вызывают гибель грамположительных и грамотрицательных микроорганизмов в течение 5–25 мин. Продукт является абсолютно безопасным для здоровья людей и животных и экологически безвредным для окружающей среды (Лезова и др.,1996).

Как было определено ранее, рациональная концентрация ПВС в прядильном растворе составляет 14 % (Рыклин и др., 2020). Вместе с тем установлено, что при введении в прядильный раствор функциональных добавок для поддержания на оптимальном уровне вязкости, электропроводности и других характеристик прядильных растворов целесообразно снижать содержание в них волокнообразующего полимера на 1–2 %.

Для исследования были приготовлены следующие образцы растворов, составы которых приведены в таблице 1. Прядильные растворы были изготовлены следующим способом. В дистиллированную воду комнатной температуры (23–25 °C) были добавлены антисептические добавки в кристаллическом виде в заданном количестве. Затем в полученный раствор добавляли ПВС. Суспензия выдерживалась на водяной бане при температуре воды 70–75 °C в течение 30–40 минут до полного растворения ПВС.

Известно, что наличие функциональных добавок в растворах волокнообразующего полимера может оказывать как положительное, так и отрицательное влияние на процесс электроформования. Это влияние связано с тем, что даже небольшое количество функционального компонента может сильно повлиять на электропроводность прядильного раствора. Так, добавление в 14 % раствор поливинилового спирта частиц серебра в количестве 0,1 %, может увеличить производительность установки для электроформования в 3 раза, однако, более высокий расход прядильного раствора при тех же параметрах процесса электроформования может снизить качество готового материала (Черников, Ржеуский, Рыклин., 2023). В то же время использование такой гемостатической добавки как хлорид алюминия может снизить скорость электроформования (Демидова и др., 2021).

В связи с этим в рамках исследования была поставлена задача определения влияния введения в прядильный раствор каждой из добавок на рациональные режимы процесса электроформования, структуру и эффективность применения нановолокнистых пленок.

Исследование структуры полученных образцов материалов осуществлялось с использованием сканирующего электронного микроскопа LEO 1420 (Carl Zeiss, Германия).

Оценка антибактериального действия полученных материалов осуществлялась методом измерения зоны задержки роста вокруг образцов на твердой питательной среде Мюллера Хинтона, а также оценкой наличия роста бактерий под ними. Для изучения антибактериальной активности использовали музейные штаммы и клинические изоляты Pseudomonas aeruginosa и Staphylococcus aureus.

Результаты исследований

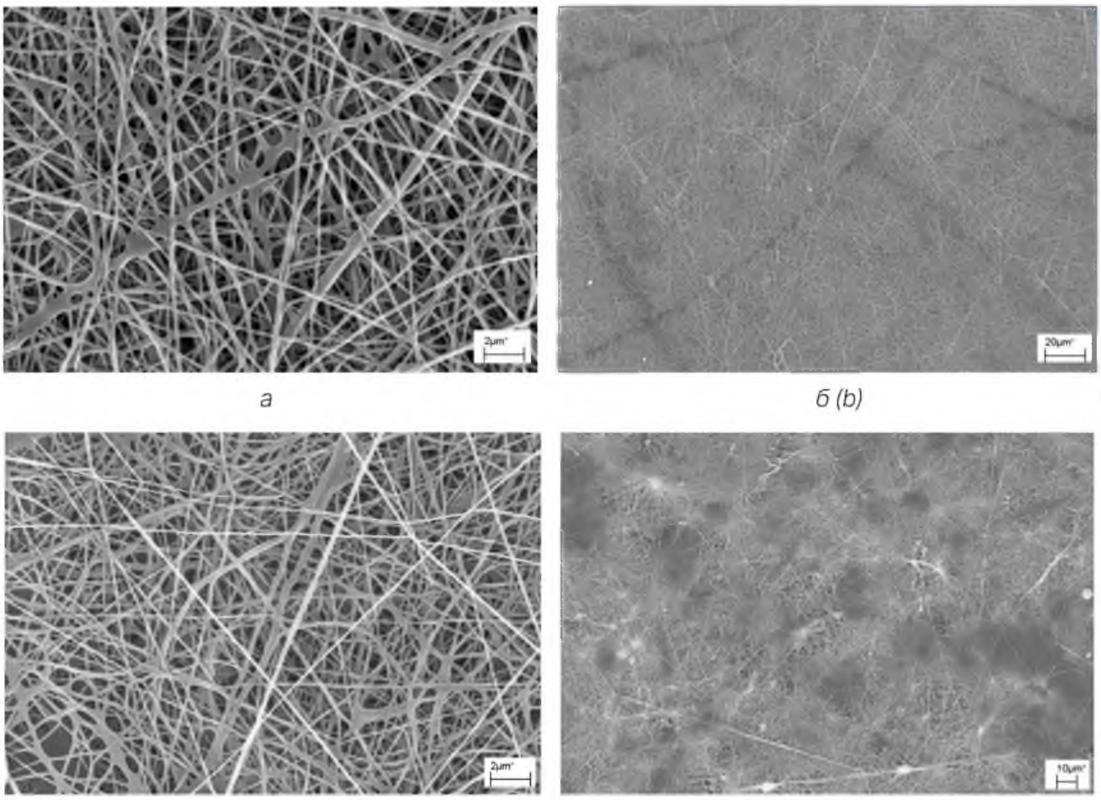
В результате проведённых экспериментов были определены рациональные режимы электроформования, представленные в таблице 1. При указанных параметрах работы установки Fluidnatek LE-50 процесс электроформования протекал стабильно, не происходил срыв капли с конца иглы, амплитуда колебаний волокнообразующей струи находилась в пределах 4–5 см. Стоит отметить, что использование добавки ПГМГ повышало производительность установки, а использование добавки ТМДЭТА дало возможность уменьшить напряжённость электростатического поля.

При получении материалов из ПВС без функциональных добавок на конце иглы из капли прядильного раствора образовывалась одна струя, расщепление которой на более тонкие струи происходило на расстоянии нескольких миллиметров, в то время как при добавлении в раствор ПГМГ и ТМДЭТА приводило к формированию 4–5 волокнообразующих струй непосредственно из капли раствора, что привело к повышению производительность установки.

Изображения структуры нановолокнистых материалов, полученные методом сканирующей электронной микроскопии, представлены на рисунке 2.

Таблица 1 – Рациональные режимы процесса электроформования
Table 1 – Rational modes of the electroforming process

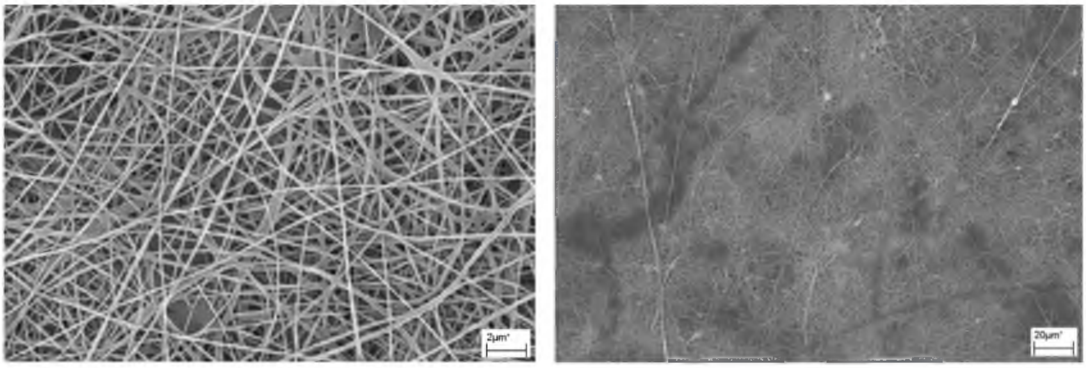
Образец	1	2	3
Состав прядильного раствора	Дистиллированная вода – 86 %; ПВС –14 %	Дистиллированная вода – 87,4 %; ПВС –12 %; ПГМГ– 0,6 %	Дистиллированная вода – 87,3 %; ПВС – 12 %; ТМДЭТА – 0,7 %
Состав нановолокнистых материалов без учета остаточной влаги	ПВС – 100 %	ПВС – 95,2 %; ПГМГ – 4,8 %	ПВС – 94,5 %; ТМДЭТА – 5,5 %
Расход, мл/ч	5	6,5	5
Расстояние между эмиттером и коллектором, см	4	4	4
Потенциал эмиттера, кВ	20	20	17
Потенциал коллектора, кВ	-6	-6	-5



а б (b)

в (c) г (d)

Рисунок 2 – СЭМ изображения нановолокнистых материалов:
а, б – образец 1; в, г – образец 2
Figure 2 – SEM image of the nanofibrous webs:
a, b – Sample 1; c, d – Sample 2



д (e) *е (f)*

*Окончание рисунка 2 – СЭМ изображения нановолокнистых материалов:
д, е – образец 3; а, в, д – x10000; б, г, е – x1000*
*End of figure 2 – SEM image of the nanofibrous webs:
e, f – Sample 3; a, c, e – x10000; b, d, f – x1000*

Анализ результатов

Анализируя изображения, полученные методом электронной микроскопии при увеличении в 10000 раз, можно отметить, что введение в состав прядильных растворов антисептических добавок не оказало существенного влияния на структуру получаемых нановолокон. Однако на изображениях, полученных при увеличении в 1000 раз, можно заметить некоторую неравномерность распределения добавок, а также наличие незначительного количества местных дефектов в виде застывших капель прядильного раствора, размеры которых не превышают 5 мкм.

Определение среднего диаметра получаемых волокон и их неравномерности по толщине осуществлялось на основе измерений 100 волокон образца по изображениям, полученным при увеличении в 10000 раз. Гистограммы распределения волокон по диаметру представлены на рисунке 3. Результаты статистической обработки полученные при измерениях данных представлены в таблице 2. Можно отметить незначительное увеличение среднего диаметра волокон, полученных при добавлении в раствор антисептических добавок. При этом во всех полученных вариантах материалов около 80 % волокон имело диаметр менее 200 нм.

Отмеченное ранее повышение производительности установки, достигаемое при получении образца 2, содержащего добавку ПГМГ, сопровождалось некоторым увеличением неровномерности материала по диаметру волокна.

Оценка эффективности нановолокнистых материалов представлена на рисунке 4.

Белый фон в чашке Петри представляет собой сплошную зону роста бактерии. На этом фоне хорошо видна чистая зона вокруг образцов, что свидетельствует о высвобождении антибактериального компонента и его действии на микроорганизм (Шеряков, 2008). Установлено, что средняя величина зоны задержки роста вокруг нановолокнистого материала для образца № 2 составляет 1,6 мм (n = 3). Для образца № 3 зона задерж-

Таблица 2 – Характеристики волокон полученных материалов
Table 2 – Characteristics of fibers of the obtained materials

	Образец 1	**Образец 2**	**Образец 3**
Средний диаметр волокна, нм	178	185	189
Коэффициент вариации по диаметру волокна, %	45	54	37

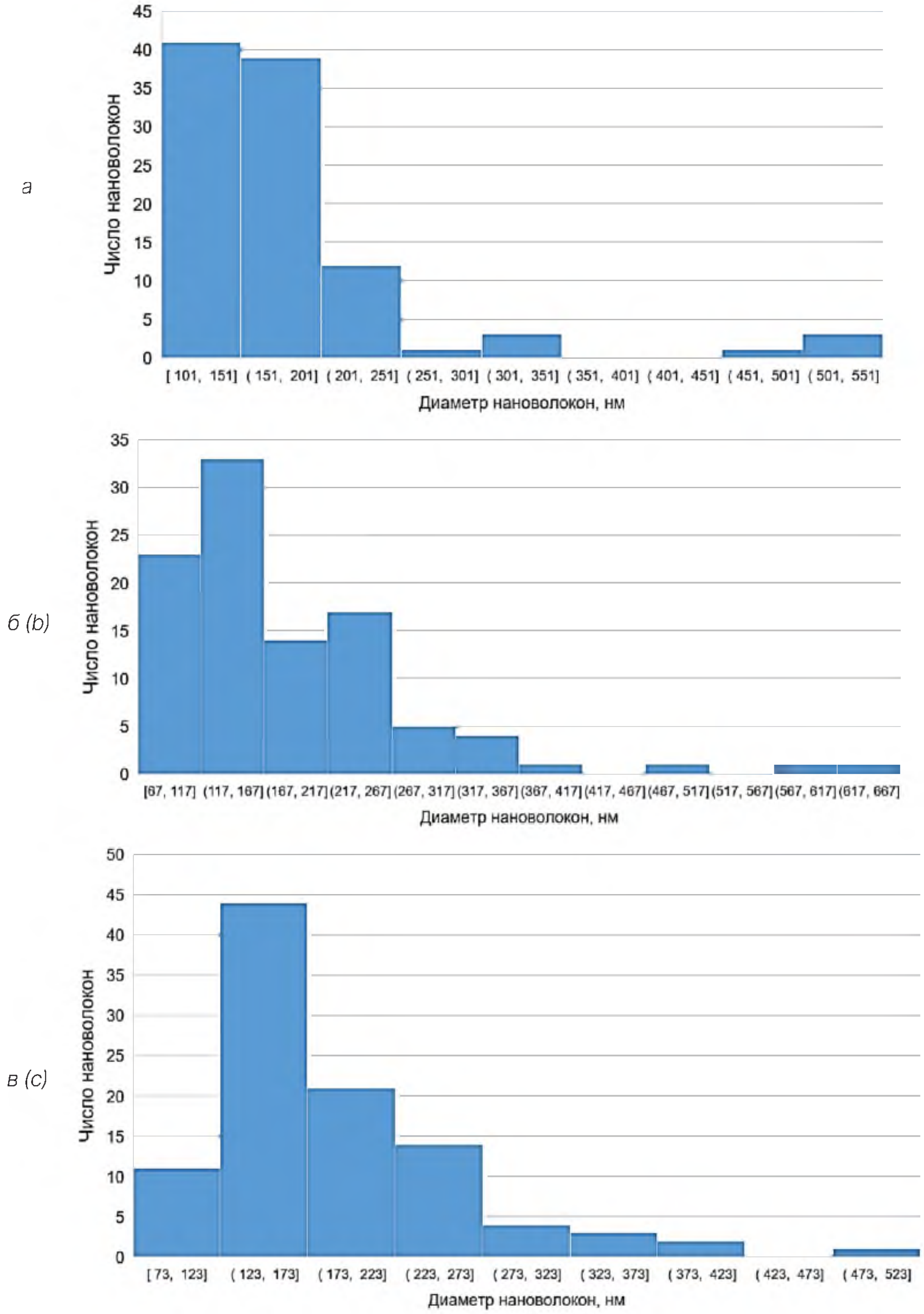


Рисунок 3 – Гистограммы распределения нановолокон по диаметру в полученных образцах нановолкнистых пленок: а – образец 1, б – образец 2; в – образец 3

Figure 3 – Histogram of nanofiber distribution by diameter in the samples of nanofibrous films: a – Sample 1; b – Sample 2; c – Sample 3

Рисунок 4 – Антибактериальная активность нановолокнистых материалов по отношению к Staphylococcus aureus. Справа образец 3, слева образец 2
Figure 4 – Antibacterial activity of nanofibrous materials against Staphylococcus aureus. Sample 3 on the right, Sample 2 on the left

ки роста наблюдается не со всех сторон, поэтому зону задержки роста следует считать равной 0.

Аналогичные результаты были получены при исследовании образцов по отношению к грамотрицательному микроорганизму Pseudomonas aeruginosa. Зона задержки роста для образца № 2 составила 2,0 мм, а для образца № 3 – от 0 до 1 мм.

Была изучена антибактериальная активность по отношению к двум микроорганизмам под образцом нановолокнистого материала. Во всех исследованиях (n = 3 для каждого образца и каждого микроорганизма) было показано, что под образцом не наблюдается рост микроорганизма.

Образец № 1 не подавлял рост микроорганизмов ни вокруг себя, ни под собой, что свидетельствует об отсутствии антибактериальной активности.

Выводы

С целью разработки антисептических нановолокнистых материалов методом электроформования в качестве антибактериальных добавок было предложено использовать тетраметилендиэтилентетрамин (ТМДЭТА) и полигексаметиленгуанидин гидрохлорид (ПГМГ).

Экспериментально установлено, что использование добавки ПГМГ способствовало повышению производительности установки для электроформования, а введение в состав прядильного раствора добавки ТМДЭТА дало возможность уменьшить напряжённость электростатического поля.

Анализ изображений, полученных методом электронной микроскопии, показал, что введение в состав прядильных растворов антисептических добавок не оказало существенного негативного влияния на структуру получаемых нановолокон.

В результате исследования можно сделать вывод о том, что использование таких функциональных добавок как ТМДЭТА и ПГМГ позволяет придать антибактериальные свойства материалу. Установлено, что образцы нановолокнистых материалов № 2 и № 3, содержащие предложенные компоненты, обладают достаточной антибактериальной активностью, чтобы в условиях лаборатории уверенно подавлять рост патогенных микроорганизмов под собой. При этом представляет интерес проведения дальнейших исследований, направленных на изучение влияния концентрации функциональных добавок на антибактериальную активность материала.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Абдулкадырова, А. ., Юсуппаева, П.П. и Аджиева, Ф.С. (2023). Антибиотикорезистентность: Исследование механизмов антибиотикорезистентности и поиск новых подходов к лечению. *Научный форум: сборник статей IV Международной научно-практической конференции, Пенза, 25 августа 2023 года*, С. 134–136.

Демидова, М.А., Новицкая, В.А., Рыклин, Д.Б. и Гвоздев, С.В. (2021). Получение гемостатических пленок методом электроформования. *Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX)*, том № 1, с. 206–211.

Демидова, М.А. и Рыклин, Д.Б. (2022). Технология получения наноструктурных изделий из электроформованных нетканых материалов. *Вестник Витебского государственного технологического университета*, том № 2 (43), с. 19–32.

Лезова, Т.Н., Улупов, Н.А., Борисов, В.В., Михалишин, В.В., Дудников, А.И. и Гембицкий, П.А. (1996). *Способ очистки и стерилизации культурального вируса ящура*. Патент РФ № 2054039.

Миклис, Н.И., Алексеев, И.С., Бурак, И.И., Дорошенко, И.А., Гончаревич, А.Л. и Ладик, Ю.С. (2020). Антимикробная активность перевязочного материала из нетканых полимерных нановолокон. *Вестник ВГМУ*, № 5.

Николаев, А.Ф. и Охрименко, Г.И. (1979). *Водорастворимые полимеры*. Ленинград: Л.: Химия, СССР.

Решедько, Г.К., Рябкова, Е.Л. и Фаращук, А.Н. (2006). Неферментирующие грамотрицательные возбудители нозокомиальных инфекций в ОРИТ России: проблемы антибиотикорезистентности. *Клиническая микробиология и антимикробная химиотерапия*, 2006, № 8(3), С. 243–259.

Рыклин, Д.Б., Ясинская, Н.Н., Демидова, М.А., Азарченко, В.М. и Скобова, Н.В. (2020). Исследование влияния свойств растворов поливинилового спирта на структуру электроформованных материалов. *Вестник Витебского государственного технологического университета*, том № 2 (39), с. 130–139.

Рыклин, Д.Б., Демидова, М.А. и Карнилов, М.С. (2024). Влияние межэлектродного расстояния на морфологию электроформованных нановолокнистых материалов. *Косыгинский Форум. Сборник научных трудов*, том № 1, С. 283–287.

Рыклин, Д.Б., Демидова, М.А. и Карнилов, М.С. (2024). Оценка паропроницаемости раневых повязок с нановолокнистым покрытием. *Вестник Витебского государственного технологического университета*, том № 2 (48), с. 18–27.

Хубутия, А.Ш., Бабич, А.В., Темнов, А.А., Ботин, А.С., Попова, Т.С., Склифас, А.Н. и Науменко, В. Ю. (2012). Применение наноматериалов в медицине. Часть 1. *Российский медицинский журнал*, том 18 (5), С. 53–56.

Шамина, О.В., Самойлова, Е.А., Новикова, И.Е. и Лазарева, А.В. (2020). Klebsiella pneumoniae: микробиологическая характеристика, антибиотикорезистентность и вирулентность. *Российский педиатрический журнал*, 2020, № 23 (3), С. 191–197. DOI: 10.18821/1560-9561-2020-23-3-191-197.

Шеряков, А.А. (2008). *Государственная фармакопея Республики Беларусь. В 3 т. Т. 2. Контроль качества вспомогательных веществ и лекарственного растительного сырья*. Молодечно: Типография «Победа», Республика Беларусь.

Chagas, P.A.M., Schneider, R., Santos, D.M., Otuka, A.J.G., Mendoca, C.R. and Correa, D.S. (2021). Bilayered electrospun membranes composed of poly(lactic-acid)/natural rubber: A strategy against curcumin photodegradation for wound dressing application. *Reactive and Functional Polymers*, vol. 163, art. 104889.

Gao, Z., Su, C., Wang, C., Zhang, Y., Wang., C., Yan, H. and Hou, G. (2021). Antibacterial and hemostatic bilayered electrospun nanofibrous wound dressings based on quaternized silicone and quaternized chitosan for wound healing. *European Polymer Journal*, vol. 159, art. 110733:

Liu, Q., Jia, H., Ouyang, W., Mu, Y. and Wu, C. (2021). Fabrication of multilayered nanofibrous scaffolds with antimicrobial properties containing drug via electrospinning for biomedical application. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 9, 755777. https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.755777.

Haider, A., Haider, S. and Kang, I.K. (2018). A comprehensive review summarizing the effect of electrospinning parameters and potential applications of nanofibers in biomedical and biotechnology. *Arabian Journal of Chemistry*, vol. 11, pp. 1165–1188.

Hermenegildo, B., Ribeiro, C., Perinka, N., Martins, P., Trchova, M., Hajna, M., Stejskal, J. and Lanceros-Mendez, S. (2022). Electroactive poly (vinylidene fluoride) electrospun fiber mats coated with polyaniline and polypyrrole for tissue regeneration applications. *Reactive and Functional Polymers*, vol. 170, art. 105118.

Jinjun, L., Weiyi, S. and Qiangbay, L. (2014). *Nano-silver anti-cancer composition for treating lung cancer as well as preparation method and application thereof* Patent CN No. 103933067.

Pillai, Mamatha M.; Dandia, Hiren; Checker, Rahul; Rokade, Sushama; Sharma, Deepak and Tayalia, Prakriti (2021). Novel combination of bioactive agents in bilayered dermal patches provides superior wound healing, *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine*, Art. 102495.

Stace, E.T., Mouthuy, P.A., Carr, A.J. and Ye, H.C. (2019). Biomaterials: Electrospinning. *Comprehensive Biotechnology (Third Edition)*, vol. 5, pp. 424–441.

Yu, J., Baek, S.W. and Cho, S.J. (2019). Experimental Study on Decomposition and Evaporation Characteristics of N,N,N′,N′-Tetramethylethylenediamine and 1,2,4-Triazole. *Energies*. 12. 3208. doi: 10.3390/en12173208.

Wang, H.S. (2009). Functional polymeric nanofibers from electrospinning. *Recent Patents on Nanotechnology*, vol. 3, pp. 21–31.

REFERENCES

Abdulkadyrova, A.T., Yusuppaeva, P.P. and Adzhieva, F. S. (2023). Antibiotic resistance: investigation of resistance mechanisms and search for new treatment approaches [Antibiotikorezistentnost': issledovanie mekhanizmov antibiotikorezistentnosti i poisk novykh podkhodov k lecheniyu]. *Nauchnyi forum: sbornik statei IV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, = Scientific Forum: Proceedings of the 4th International Scientific and Practical Conference*, pp. 134–136 (In Russian).

Demidova, M.A., Novitskaya V.A., Ryklin, D.B. and Gvozdev, S.V. (2021). Production of hemostatic films by electrospinning [Poluchenie gemostaticheskih plenok metodom elektroformovaniya]. *Fizika voloknistyh materialov: struktura, svojstva, naukoemkie tekhnologii i materialy (SMARTEX) = Physics of fibrous materials: structure, properties, science-intensive technologies and materials (SMARTEX)*, vol. 1, pp. 206–211 (In Russian).

Demidova, M.A. and Ryklin, D.B. (2022). Technology for producing nanostructured products from electrospun nonwoven materials [Tekhnologiya polucheniya nanostrukturnyh izdelij iz elektroformovannyh netkanyh materialov]. *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta = Vestnik of the Vitebsk State Technological University*, vol. 2, no. 43, pp. 19–32 (In Russian).

Lezova, T.N., Ulupov, N.A., Borisov, V.V., Mikhalishin, V.V., Dudnikov, A.I. and Gembitsky, P.A. (1996). *Method for purification and sterilization of foot-and-mouth disease virus culture*. Patent RF No 2054039 (In Russian).

Liu, Q., Jia, H., Ouyang, W., Mu, Y., & Wu, C. (2021). Fabrication of multilayered nanofibrous scaffolds with antimicrobial properties containing drug via electrospinning for biomedical application. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 9, 755777. https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.755777.

Miklis, N.I., Alekseev, I.S., Burak, I.I., Doroshenko, I.A., Goncharevich, A.L. and Ladik, Y.S. (2020). Antimicrobial activity of dressing material made of nonwoven polymer nanofibers [Antimikrobnaya aktivnost' perevyazochnogo materiala iz netkanykh polimernykh nanovolokon]. *Vestnik VGMU = VSMU Bulletin*, (5), (In Russian).

Nikolaev, A.F. and Okhrimenko, G.I. (1979). *Vodorastvorimye polimery* [Water-soluble polymers]. Leningrad: L.: Chemistry, USSR (In Russian).

Pillai, Mamatha M.; Dandia, Hiren; Checker, Rahul; Rokade, Sushama; Sharma, Deepak and Tayalia, Prakriti (2021). Novel combination of bioactive agents in bilayered dermal patches provides superior wound healing, *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine*, Art. 102495.

Reshedko, G.K., Ryabkova, E.L. and Farashchuk, A.N. (2006). Non-fermenting Gram-negative pathogens of nosocomial infections in Russian ICUs: problems of antibiotic resistance [Nefermentiruyushchie gramotritsatel'nye vozbuditeli nozokomial'nykh infektsiy v ORIT Rossii: problemy antibiotikorezistentnosti]. *Klinicheskaya mikrobiologiya i antimikrobnaya khimioterapiya = Clinical Microbiology and Antimicrobial Chemotherapy*, 8(3), 243–259 (In Russian)

Ryklin, D.B., Yasinskaya, N.N., Demidova, M.A., Azarchenko, V.M. and Skobova, N.V. (2020). Study of the influence of polyvinyl alcohol solution properties on the structure of electroformed materials [Issledovanie vliyaniya svoystv rastvorov polivinilovogo spirta na strukturu elektroformovannykh materialov]. *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta = Vestnik of Vitebsk State Technological University*, 2(39), pp. 130–139 (In Russian).

Ryklin, D.B., Demidova, M.A. and Karnilov, M.S. (2024). The effect of interelectrode distance on the morphology of electrospun nanofibrous materials [Vliyanie mezhelektrodnogo rasstoyaniya na morfologiyu elektroformovannyh nanovoloknistyh materialov]. *Kosyginskij Forum. Sbornik nauchnyh trudov = Kosygin Forum. Collection of scientific papers*, vol. 1, pp. 283–287 (In Russian).

Ryklin, D.B., Demidova, M.A. and Karnilov, M.S. (2024). Evaluation of water vapor permeability of wound dressings with nanofiber coating [Otsenka paropronitsaemosti ranevykh povyazok s nanovoloknistym pokrytiem]. *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta = Bulletin of the Vitebsk State Technological University*, vol. 2, no. 48, pp. 18–27 (In Russian).

Khubutia, A.Sh., Babich, A.V., Temnov, A.A., Botin, A.S., Popova, T.S., Sklifas, A.N. and Naumenko, V.Yu. (2012). Application of nanomaterials in medicine. Part 1 [Primenenie nanomaterialov v medicine. chast' 1]. *Rossijskij medicinskij zhurnal = Russian Medical Journal*, vol. 18, no. 5, pp. 53–56 (In Russian).

Chagas, P.A.M., Schneider, R., Santos, D.M., Otuka, A.J.G., Mendoca, C.R. and Correa, D.S. (2021). Bilayered electrospun membranes composed of poly(lactic-acid)/natural rubber: A strategy against curcumin photodegradation for wound dressing application. *Reactive and Functional Polymers*, vol. 163, art. 104889.

Gao, Z., Su, C., Wang, C., Zhang, Y., Wang., C., Yan, H. and Hou, G. (2021). Antibacterial and hemostatic bilayered electrospun nanofibrous wound dressings based on quaternized silicone and quaternized chitosan for wound healing. *European Polymer Journal*, vol. 159, art. 110733.

Haider, A., Haider, S. and Kang, I.K. (2018). A comprehensive review summarizing the effect of electrospinning parameters and potential applications of nanofibers in biomedical and biotechnology. *Arabian Journal of Chemistry*, vol. 11, pp. 1165–1188.

Hermenegildo, B., Ribeiro, C., Perinka, N., Martins, P., Trchova, M., Hajna, M., Stejskal, J. and Lanceros-Mendez, S. (2022). Electroactive poly (vinylidene fluoride) electrospun fiber mats coated with polyaniline and polypyrrole for tissue regeneration applications. *Reactive and Functional Polymers*, vol. 170, art. 105118.

Jinjun, L., Weiyi, S. and Qiangbay, L. (2014). *Nano-silver anti-cancer composition for treating lung cancer as well as preparation method and application thereof* Patent CN No. 103933067.

Shamina, O.V., Samoylova, E.A., Novikova, I.E., and Lazareva, A.V. (2020). Klebsiella pneumoniae: microbiological characteristics, antibiotic resistance, and virulence [Klebsiella pneumoniae: mikrobiologicheskaya kharakteristika, antibiotikorezistentnost' i virulentnost']. *Rossiyskiy pediatricheskiy zhurnal = Russian Pediatric Journal*, 23(3), 191–197. https://doi.org/10.18821/1560-9561-2020-23-3-191-197 (In Russian).

Sheryakov, A.A. (2008). *Gosudarstvennaya farmakopeya Respubliki Belarus. V 3. T 2. Kontrol' kachestva vspomogatel'nykh veshchestv i lekarstvennogo rastitel'nogo syr'ya* [State Pharmacopoeia of the Republic of Belarus. In 3 vols. Vol. 2. Quality control of excipients and medicinal plant raw materials]. Molodechno: Tipografiya "Pobeda", Republic of Belarus (In Russian).

Stace, E.T., Mouthuy, P.A., Carr, A.J. and Ye, H.C. (2019). Biomaterials: Electrospinning. *Comprehensive Biotechnology (Third Edition)*, vol. 5, pp. 424–441.

Wang, H.S. (2009). Functional polymeric nanofibers from electrospinning. *Recent Patents on Nanotechnology*, vol. 3, pp. 21–31.

Информация об авторах

Карнилов Михаил Сергеевич
Аспирант кафедры «Техническое регулирование и товароведение», Витебский государственный технологический университет, Республика Беларусь.
E-mail: alphamiha@mail.ru

Рыклин Дмитрий Борисович
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Техническое регулирование и товароведение», Витебский государственный технологический университет, Республика Беларусь.
E-mail: ryklin-db@mail.ru

Ржеусский Сергей Эдуардович
Кандидат фармацевтических наук, доцент кафедры «Организация и экономика фармации», Витебский государственный ордена Дружбы народов медицинский университет, Республика Беларусь.
E-mail: sirrr@inbox.ru

Information about the authors

Mikhail S. Karnilov
Postgraduate Student of the Department "Technical Regulation and Commodity Science", Vitebsk State Technological University, Republic of Belarus.
E-mail: alphamiha@mail.ru

Dzmitry B. Ryklin
Doctor of Science (in Engineering), Professor, Chair of the Department "Technical Regulation and Commodity Science", Vitebsk State Technological University, Republic of Belarus.
E-mail: ryklin-db@mail.ru

Sergey E. Rzheussky
Candidate of Sciences (in Pharmacy), Associate Professor at the Department "Management and Economy of Pharmacy", Vitebsk State Order of Peoples' Friendship Medical University, Republic of Belarus.
E-mail: sirrr@inbox.ru