

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«ВИТЕБСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

Объект авторского права

УДК 677.076.49 : 620.3

ДЕМИДОВА
Мария Александровна

**ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВОДОРАСТВОРИМЫХ
НАНОВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ
ЭЛЕКТРОФОРМОВАНИЯ**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности 05.19.02 – «Технология и первичная обработка
текстильных материалов и сырья»

Витебск, 2023

Научная работа выполнена в учреждении образования
«Витебский государственный технологический университет»

Научный руководитель: **Рыклин Дмитрий Борисович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Техническое регулирование и товароведение» учреждения образования «Витебский государственный технологический университет».

Официальные оппоненты: **Шустов Юрий Степанович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой материаловедения и товарной экспертизы Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)»;

Шашок Жанна Станиславовна, доктор технических наук, профессор кафедры «Полимерные композиционные материалы» учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет»

Оппонирующая организация: Учреждение образования «Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий»

Защита состоится «21» декабря 2023 г. в 13.00 на заседании совета по защите диссертаций К 02.11.01 в учреждении образования «Витебский государственный технологический университет» по адресу:
210038, г. Витебск, Московский проспект, 72.
E-mail: vstu@vitebsk.by

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Витебский государственный технологический университет».

Автореферат разослан «17» ноября 2023 года.

Ученый секретарь совета по защите диссертаций, кандидат технических наук, доцент

 Н.В. Скобова

ВВЕДЕНИЕ

Электроформование является современным методом получения нановолокнистых материалов различного назначения. Перспективность исследований по данному направлению подтверждается растущим числом разработок в области создания новых видов материалов методом электроформования. Это связано с уникальными свойствами вырабатываемых нановолокон и возможностью придания им специфических характеристик, что обеспечивает большую гибкость в функциональных возможностях получаемых материалов.

Значительный интерес представляет разработка инновационных нановолокнистых материалов, покрытий и структур для нужд медицины и косметологии, особое место среди которых занимают водорастворимые нановолокнистые материалы. В Республике Беларусь исследований по получению водорастворимых нановолокнистых материалов ранее не проводилось.

В то же время, создание электроформованных материалов, покрытий и структур соответствует результатам Комплексного прогноза научно-технического прогресса на 2021–2025 гг. и на период до 2040 г., согласно которому материалы и изделия медицинского или косметологического назначения из нановолокнистых материалов или с нановолокнистыми покрытиями имеют высокий потенциал для применения в медицине и фармакологии и включены в перечень перспективных товаров и технологий для разработки в Республике Беларусь. Также развитие сферы нанотехнологий является одним из приоритетных направлений развития экономики страны, приведенных в Стратегии «Наука и технологии: 2018–2040».

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами (проектами), темами.

Работа выполнена в соответствии с:

- заданием «Исследование процесса формирования нанокompозитных текстильных структур на основе волокон типа «ядро-оболочка» ГПНИ «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии», № ГР 20201559;

- НИР «Разработка неоднородных функциональных нановолокнистых материалов и покрытий медицинского и косметологического назначения» в рамках задания 2.15 «Формирование методами плазмохимии, электроформования, Ленгмюра – Блоджетт и термогидрохимической обработки наноразмерных органических, керамических покрытий заданного состава и структуры с высокими защитными, триботехническими, биodeградирующими свойствами» ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограмма «Наноструктурные материалы, нанотехнологии, нанотехника («Наноструктура»)), № ГР 20211001;

- аспирантским грантом «Проектирование структуры неоднородных электроформованных материалов с механизмом таргетной доставки лекарств», № ГР 20211066.

Цель и задачи исследования.

Целью диссертационной работы является разработка новых видов водорастворимых нановолокнистых материалов различной структуры, получаемых методом электроформования, для использования в медицине и косметологии, а также технологических рекомендаций по их получению.

В соответствии с указанной целью в работе решались следующие основные задачи:

- разработать составы прядильных растворов для обеспечения стабильного процесса электроформования водорастворимых нановолокнистых материалов;
- определить влияние состава прядильных растворов на их физические свойства, имеющие существенное значение при реализации процесса электроформования;
- установить математические зависимости и закономерности, описывающие влияние режимов электроформования и состава прядильных растворов на структуру и свойства электроформованных материалов;
- разработать технологические рекомендации по производству широкого ассортимента водорастворимых нановолокнистых материалов медицинского и косметологического назначения.

Объект и предмет исследования.

Объектом исследования являются водорастворимые нановолокнистые материалы.

Предмет исследований – технологический процесс получения нановолокнистых материалов методом электроформования.

Научная новизна:

- получены новые экспериментальные зависимости и закономерности, характеризующие влияние состава прядильных растворов на основе поливинилового спирта с добавлением глицерина на их динамическую вязкость, плотность, удельную электрическую проводимость, поверхностное натяжение и интенсивность испарения растворителя;
- получены зависимости расхода прядильного раствора поливинилового спирта с добавлением глицерина от электрического потенциала эмиттера и расстояния между эмиттером и коллектором;
- получены математические зависимости, описывающие влияние расхода и состава прядильных растворов из поливинилового спирта и глицерина на диаметр получаемых волокон;
- впервые научно обоснована и подтверждена гипотеза о том, что при стационарном процессе электроформования распределение полимерных нановолокон по диаметру подчиняется логнормальному закону;
- получены экспериментальные данные, характеризующие влияние частоты вращения осадительного электрода на степень ориентации нановолокон из поливинилового спирта с добавлением глицерина и, как следствие, на разрывную нагрузку и удлинение получаемых материалов;

- впервые определено влияние радиационной стерилизационной обработки на изменение свойств нетканых нановолокнистых материалов;
- предложены состав, структура и технология получения гемостатической медицинской пленки с механизмом доставки лекарств на основе поливинилового спирта, рекомендации по выбору способа приготовления прядильного раствора для ее изготовления.

Положения, выносимые на защиту:

- математические зависимости и экспериментальные данные, характеризующие влияние составов прядильных растворов на основе поливинилового спирта с добавлением глицерина на свойства растворов и стабильность процесса электроформования, позволившие обосновать составы прядильных растворов на основе поливинилового спирта;
- математическая модель, описывающая влияние расхода прядильного раствора на основе поливинилового спирта и содержания в нем глицерина на среднее значение диаметра волокон, которая может быть использована при проектировании структуры получаемых нановолокнистых материалов;
- обоснование логнормального закона распределения полимерных нановолокон по диаметру при стационарном процессе электроформования и соответствия фактического распределения данному закону в качестве дополнительного критерия стабильности процесса электроформования;
- влияние частоты вращения осадительного электрода в диапазоне от 200 до 2000 мин⁻¹ на степень ориентации нановолокон, разрывную нагрузку и удлинение нановолокнистых материалов;
- влияние радиационной стерилизационной обработки на изменение свойств нетканых нановолокнистых материалов, выработанных методом электроформования из растворов на основе поливинилового спирта;
- состав и способ приготовления раствора с добавлением гемостатических компонентов 1,7 % хлорида алюминия и 0,8 % хлорида железа для получения нановолокнистого материала, обеспечивающего высокую эффективность достижения гемостаза при применении их в качестве медицинской пленки в хирургии;
- рациональные режимы процесса электроформования водорастворимых нановолокнистых материалов медицинского и косметологического назначения: электрический потенциал эмиттера +28–29 кВ, электрический потенциал коллектора -9 кВ, расстояние от эмиттера до коллектора 10–12 см, частота вращения коллектора 250 мин⁻¹, а также рекомендации по корректировке режимов с учетом структуры и составов получаемых материалов.

Личный вклад соискателя.

Соискателем лично:

- определено влияние составов прядильных растворов на их свойства;
- разработана математическая модель, описывающая влияние расхода прядильного раствора на основе поливинилового спирта и содержание в нем глицерина на диаметр получаемых волокон;

- обоснован закон распределения нановолокон по диаметру при стационарном процессе расщепления полимерной струи при электроформовании;
- установлено влияние частоты вращения осадительного электрода на степень ориентации нановолокон, разрывную нагрузку и удлинение нановолокнистых материалов;
- разработаны технологические рекомендации по получению электроформованных неоднородных нановолокнистых материалов медицинского и косметологического назначения различного состава и структуры, в том числе материала с механизмом доставки лекарств, характеризующегося высокой эффективностью достижения гемостаза.

Научным руководителем оказывалась консультативная помощь в выборе методологии исследования и интерпретации полученных результатов.

Другими соавторами публикаций являются: заведующая кафедрой «Экология и химические технологии» УО «ВГТУ» Ясинская Н.Н. и доцент кафедры Скобова Н.В., которые принимали участие в анализе свойств прядильных растворов; аспирант Азарченко В.М., обеспечивавший техническую поддержку экспериментальных исследований по обоснованию рациональных режимов процесса электроформования; доцент ВГМУ Ржеусский С.Э. и магистрант Молоток В.А, которые проводили оценку специфической фармакологической активности фармацевтической композиции разработанных гемостатических пленок.

Апробация результатов диссертации.

Основные результаты диссертационной работы были доложены и опубликованы в материалах и тезисах докладов на международных и республиканских конференциях: 52-я и 54-я Международные научно-технические конференции преподавателей и студентов (Витебск, 2019, 2021); Всероссийская научно-практическая конференция «Научные исследования и разработки в области дизайна и технологий» (Кострома, 2019); Национальные молодежные научно-технические конференции «ПОИСК» (Иваново, 2019, 2021, 2022); Международный Косыгинский форум «Современные задачи инженерных наук» (Москва, 2019); IV, V и VI Международные научно-практические конференции «Education and science in the 21st century» (Витебск, 2019–2021); Международная научно-техническая конференция «Инновационные технологии в текстильной и легкой промышленности» (Витебск, 2019); XXI и XXII Международные научно-практические форумы SMARTEX-2020 (Иваново, 2020, 2021); Международный научно-практический симпозиум «Прогрессивные технологии и оборудование: текстиль, одежда, обувь» (Витебск, 2020); 73-я научно-практическая конференция студентов и молодых ученых «Актуальные вопросы современной медицины и фармации» (Витебск, 2021); Международная научно-практическая конференция «Современные концепции обеспечения качества изделий хлопковой, текстильной и легкой промышленности» (Наманган, 2021); XIV Всероссийская научно-практическая студенческая конференция «России – творческую молодежь» (Камышин, 2021); Международный научно-технический симпозиум «Повышение энергоресурсоэффективности и экологической безопасности процессов и аппаратов химической и смежных отраслей

промышленности» (Москва, 2021); Международный научно-технический симпозиум «Современные инженерные проблемы ключевых отраслей экономики страны» (Москва, 2021); Международные научно-технические конференции «Инновации в текстиле, одежде и обуви (ИСТАИ)» (Витебск, 2021, 2022).

Получены диплом III степени Международного конкурса научно-исследовательских работ «Наука – практике 2020» по направлению «Технические науки»; диплом за 1 место в конкурсе за лучшее представление результатов НИР Национальной молодежной научно-технической конференции «ПОИСК-2021»; диплом II степени Всероссийского молодежного конкурса научно-технических проектов «ЛЕГПРОМНАУКА»; разработка «Водорастворимые нановолокнистые материалы для медицины и косметологии» вышла в финал Республиканского конкурса «100 идей для Беларуси» 2022 г.

Опубликованность результатов диссертации.

По результатам исследований опубликовано 33 печатные работы, в том числе 8 в научных изданиях, включенных в перечень изданий, утвержденных ВАК Республики Беларусь, Российской Федерации и Республики Узбекистан. Общий объем опубликованных материалов составляет 16,58 авторского листа, в том числе объем публикаций, соответствующих п. 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, – 6,41 авторского листа. Подана заявка на патент № а 20220235 от 03.10.2022 г.

Структура и объем диссертации.

Диссертация содержит введение, общую характеристику работы, пять глав, заключение, библиографический список и приложения. Общий объем работы составляет 174 страницы, в том числе 100 страниц текста. Объем, занимаемый 61 рисунком, 29 таблицами и 4 приложениями, составляет 56 страниц. Библиографический список содержит 210 наименований, список которых изложен на 18 страницах, включая собственные публикации соискателя на 5 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Первая глава посвящена анализу отечественных и зарубежных источников по вопросам получения нановолокнистых материалов, покрытий и структур методом электроформования. Установлено, что исследования по данному направлению проводятся на стыке наук и имеют междисциплинарный характер.

В процессе электроформования получение полимерных волокон происходит в результате действия электростатических сил на электрически заряженную струю прядильного раствора. В зависимости от конструкции применяемого оборудования раствор может поступать в зону электроформования через иглу формовочной головки под действием шприцевого насоса или с поверхности формирующего электрода, который вращается, частично погружаясь в ванну с раствором. Под действием электрического поля на конце иглы или на поверхности формирующего электрода образуются положительно заряженные струйки прядильного раствора, которые отталкиваются друг от друга, перемещаются, вибрируют, расщепляются и утоняются. В результате испарения растворителя струйки затвердевают, превращаясь в волокна диаметром от 50 до 500 нм, и под действием электростатических сил осаждаются на подложке (бумага, ткань, нетканый текстильный материал и т. д.). В данной работе для реализации процесса электроформования использована установка Fluidnatek LE-50, на которой подача раствора осуществляется через иглу формовочной головки (рисунок 1).

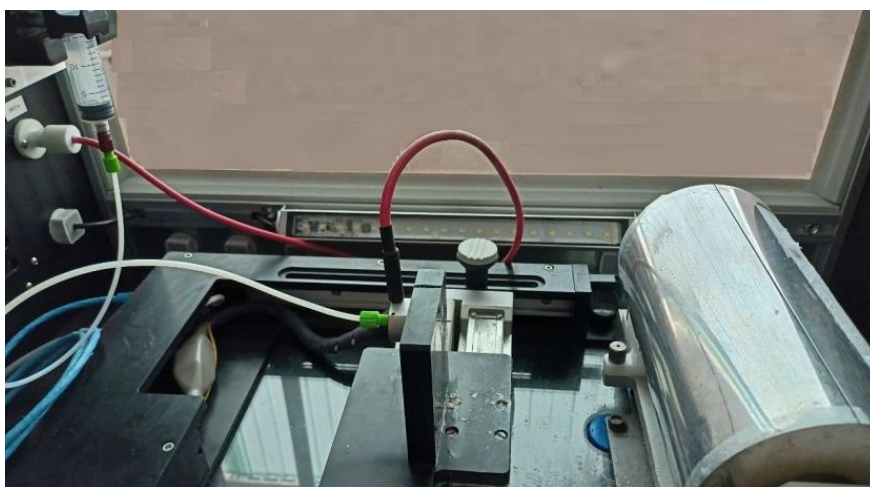


Рисунок 1 – Внешний вид рабочей зоны установки Fluidnatek LE-50

В настоящее время в мире активно ведутся разработки нетканых нановолокнистых материалов, покрытий и структур для различных нужд медицины, что связано с повышенными требованиями к безопасности, предъявляемыми медициной к используемым средствам, а также возможностью создавать материалы с различным профилем растворения, обеспечивающим последовательное выделение веществ в соответствии с принципом доставки лекарств. Применение водорастворимых полимеров накладывает определенные ограничения, поскольку растворителем в таком случае выступает дистиллированная вода, обла-

дающая низкой электрической проводимостью и высоким поверхностным натяжением, что затрудняет процесс электроформования нановолокон.

На основании анализа литературы сформулированы цель, задачи и основные направления исследования по теме диссертации.

Во второй главе осуществляется выбор состава прядильных растворов для получения водорастворимых нановолокнистых материалов, описывается влияние состава прядильных растворов на их физические свойства.

К нановолокнистым полимерным материалам, покрытиям и конструкциям при их использовании в медицине и косметологии предъявляется ряд требований, в том числе биосовместимость, отсутствие токсической нагрузки на организм пациента и иммунного ответа, специфический характер и скорость растворения, способность выведения из организма пациента и не накопление в тканях и органах, отсутствие или сведение к минимуму побочных эффектов.

Для получения водорастворимых нановолокнистых материалов в работе выбран поливиниловый спирт (ПВС). Он нетоксичен, активизирует процессы всасывания и проникновения лекарственных средств через слизистые оболочки и кожу, обладает относительно низкой стоимостью. Для проведения исследований были использованы ПВС двух марок: Selvol 205 компании Sekisui Specialty Chemicals Europe S.L. (США) и Arkofil компании Archroma (Швейцария).

Для получения нановолокнистых материалов, покрытий и структур принято решение использовать ПВС марки Arkofil, в связи с тем, что максимальный расход прядильного раствора на его основе при стабильном процессе электроформования составил 1,6 мл/ч, что почти в 3 раза превышает значение соответствующего показателя для ПВС марки Selvol 205.

Проведена оценка свойств прядильных растворов на основе ПВС с добавлением 85%-го раствора глицерина для электроформования нановолокнистых материалов. Выбор глицерина в качестве функционального компонента обоснован тем, что он сохраняет влагу в клетках кожи, обладает антисептическими свойствами, а также применяется в инновационной медицине не только в качестве активного компонента различных терапевтических средств, но и при производстве нановолокнистых материалов в качестве вспомогательного вещества. При проведении исследований в водные растворы, содержащие от 10 до 14 % ПВС, добавлялся глицерин в количестве от 0 до 30 %.

Для измерения динамической вязкости прядильных растворов использовался вискозиметр ротационного типа RM 100 Plus фирмы Lamy Rheology Instruments (Франция). Электропроводность растворов измерялась с помощью кондуктометра HANNA 8733. Плотность растворов определялась пикнометром. Измерение поверхностного натяжения осуществлялось сталагмометрическим методом. Для определения интенсивности испарения использовалась емкость, помещенная на платформу электронных аналитических весов.

Получены модели, описывающие влияние содержания ПВС x_1 в растворе данного полимера и раствора глицерина x_2 в формовочном растворе в кодированных значениях на его свойства:

- на динамическую вязкость (рисунок 2 а):

$$\eta = 1154,50 + 396,12 \cdot x_1 - 213,95 \cdot x_2 - 157,64 \cdot x_1 \cdot x_2 - 268,88 \cdot x_1^2; \quad (1)$$

– на плотность раствора (рисунок 2 б):

$$\rho = 1068,28 + 7,46 \cdot x_1 + 28,61 \cdot x_2; \quad (2)$$

– на удельную объемную электропроводность (рисунок 2 в):

$$\eta = 324,50 + 41,00 \cdot x_1 - 131,23 \cdot x_2. \quad (3)$$

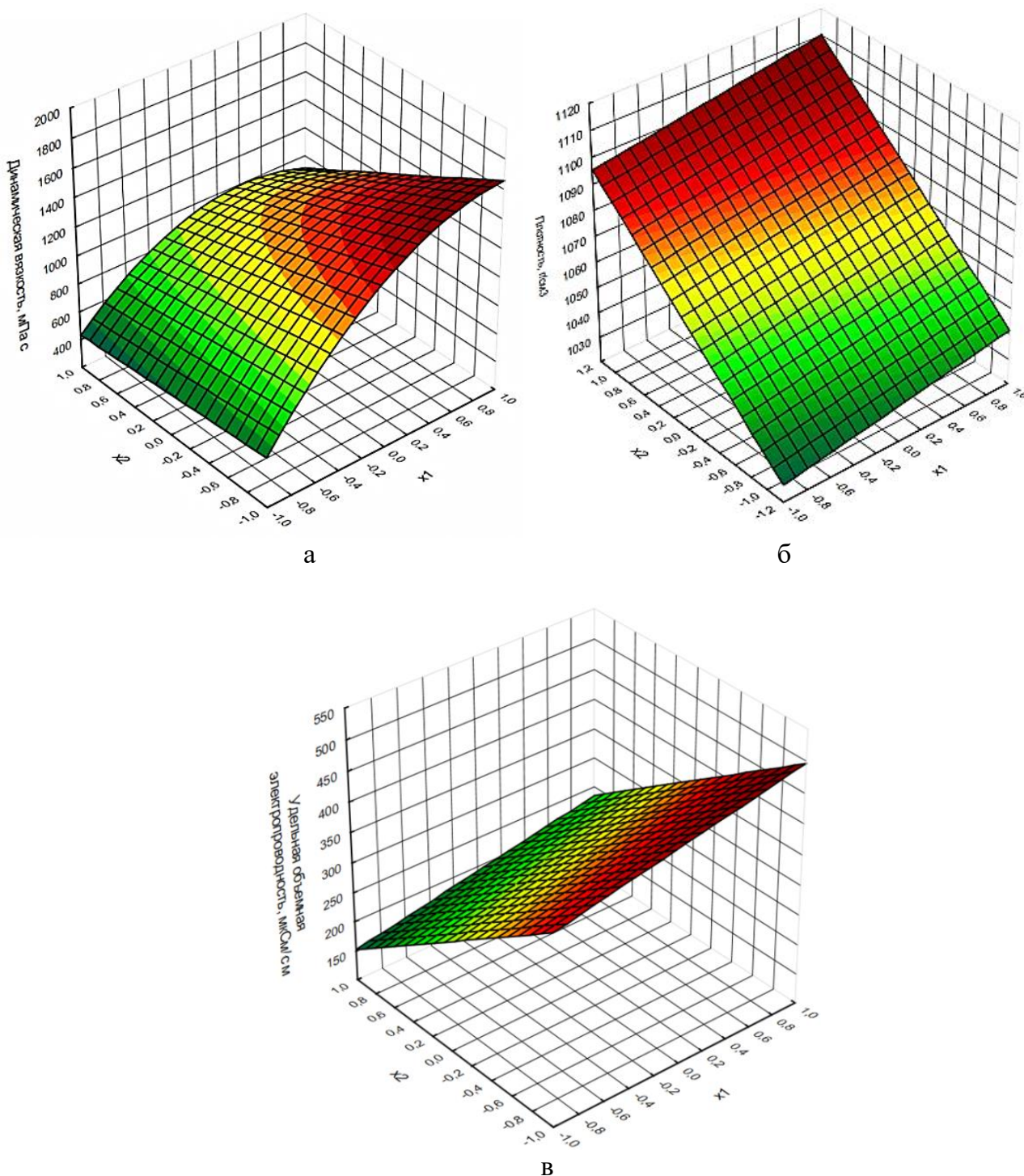


Рисунок 2 – Зависимости свойств растворов от входных факторов эксперимента

Установлено, что значения показателей поверхностного натяжения и динамической вязкости растворов не входят в рекомендуемый диапазон значений для прядильных растворов, используемых при электроформовании, в связи с чем необходимо уделить особое внимание экспериментальным исследованиям, направленным на поиск рациональных режимов их переработки. Окончательное решение о выборе используемых композиций из ПВС и глицерина будет приниматься после проведения исследований процесса электроформования.

В третьей главе установлено влияние параметров процесса на протекание электроформования и определены рациональные параметры электроформования неоднородных нановолокнистых материалов.

Получена модель, описывающая влияние электрического потенциала эмиттера $P_э$ (кВ) и расстояния от эмиттера до коллектора L (см) на расход прядильного раствора, мл/ч:

$$Q = 1,043527 - 0,136596 \cdot P_э - 0,006654 \cdot L^2 + 0,004382 \cdot P_э^2 + 0,005097 \cdot L \cdot P_э. \quad (4)$$

Оптимальные значения электрических потенциалов эмиттера $P_э$ и коллектора $P_к$ связаны следующим соотношением, кВ:

$$P_к = 26 - 11,5 \cdot \sqrt[3]{P_э}. \quad (5)$$

Зависимость расхода прядильного раствора от электрического потенциала эмиттера и межэлектродного расстояния при стабильном процессе электроформования представлена на рисунке 3.

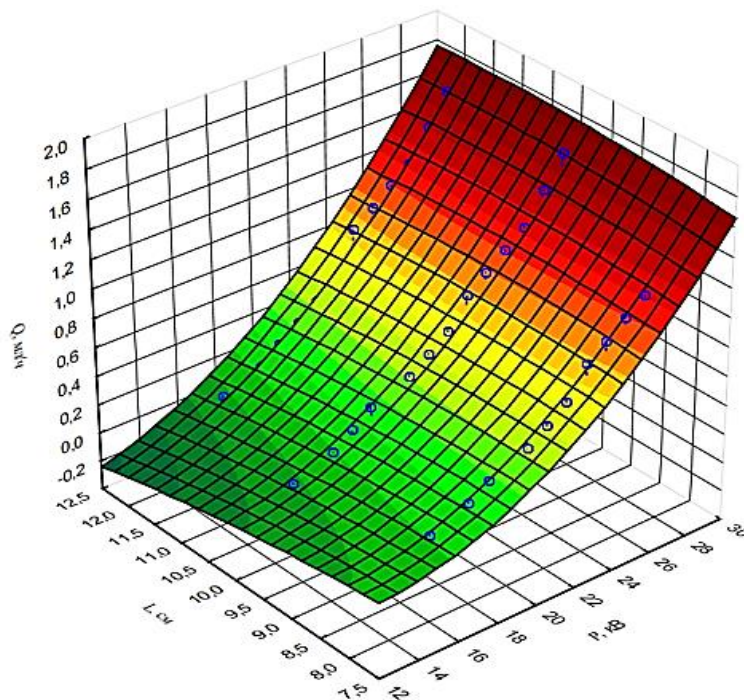
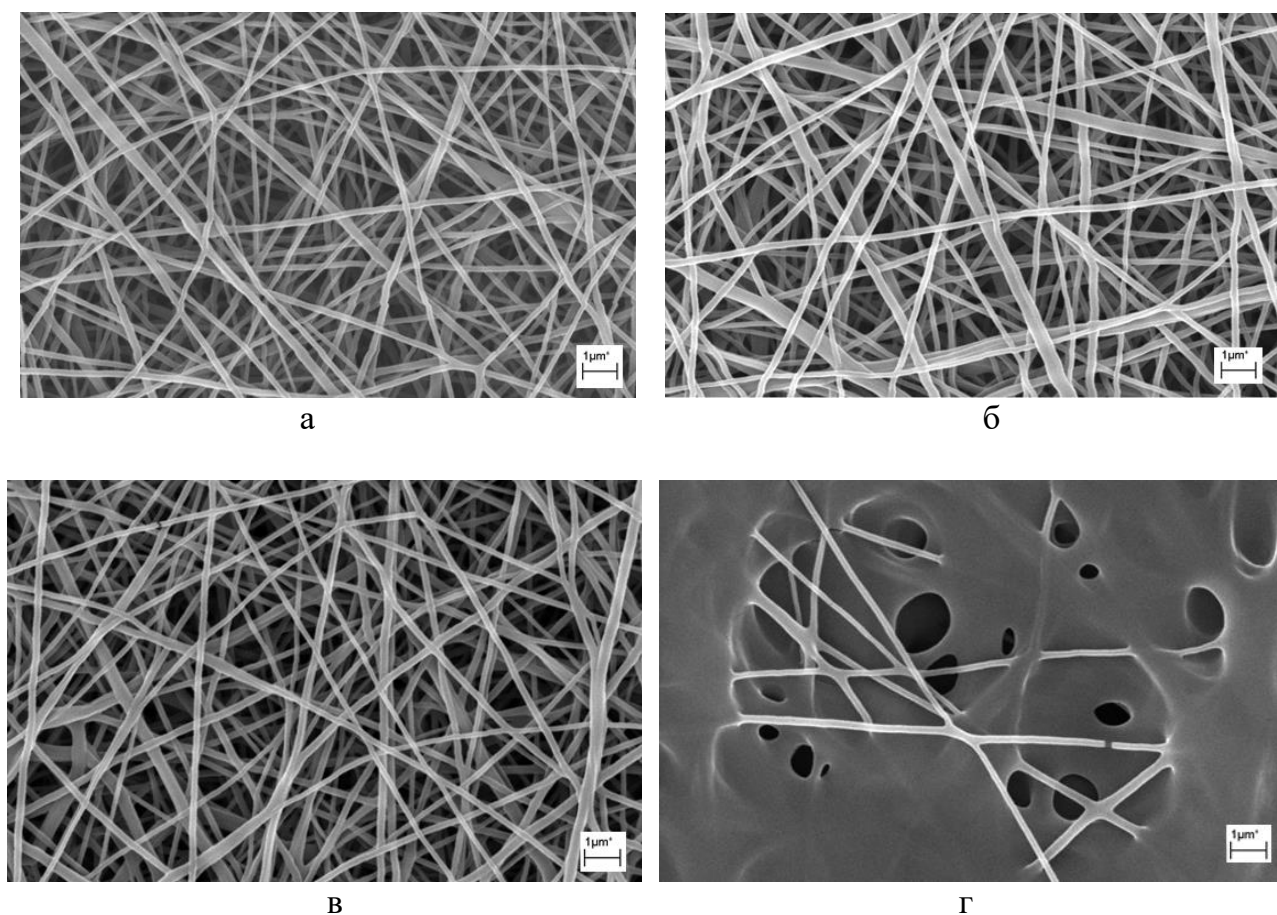


Рисунок 3 – Зависимость расхода прядильного раствора от электрического потенциала эмиттера и расстояния от эмиттера до коллектора

При электроформовании нановолокнистых материалов с добавлением функциональных компонентов данные зависимости сохраняются, при этом наблюдается снижение расхода раствора на 20–40 %. Определено влияние состава растворов на основе ПВС с различным содержанием глицерина на структуру и морфологию нановолокнистых материалов (рисунок 4). Исследования образцов осуществлялись методом сканирующей электронной микроскопии с помощью микроскопа LEO 1420 (Carl Zeiss). Во всех образцах, полученных с добавлением глицерина, данный компонент обволакивает волокна, сформированные из ПВС, при этом из него отдельные волокна не формируются. Фактически материалы состоят из волокон, большая часть которых имеет структуру «ядро-оболочка», то есть стержневой слой получен из ПВС, а наружный – из глицерина. Средние значения диаметров волокон составили от 157,45 до 212,44 нм.

Установлено, что для получения материала с нановолокнистой структурой и четкими границами нановолокон содержание глицерина в растворе не должно превышать 8 %. Для получения материала из плотной сетки или пленки, содержащих наноразмерные поры, рекомендуется производить электроформование из раствора, содержащего от 8 до 10 % глицерина.



а – 0 %; б – 4 %; в – 7 %; г – 10 %

Рисунок 4 – Изображения нановолокнистых материалов ($\times 15000$) при электроформовании из 14%-го раствора ПВС с добавлением глицерина

В результате статистической обработки экспериментальных данных получена модель, описывающая в натуральных величинах влияние расхода прядильного раствора на диаметр волокна без добавления глицерина:

$$d = 138 + 24 \cdot Q, \quad (6)$$

где d – диаметр волокна из раствора ПВС, нм;

Q – расход прядильного раствора, мл/ч.

Изменение диаметра волокна за счет добавления глицерина в формовочный раствор описывается следующей моделью:

$$\Delta d = \frac{270}{Q^3} \cdot \frac{\beta}{12 + \beta^2}, \quad (7)$$

где Δd – изменение диаметра волокна за счет добавления глицерина в прядильный раствор, нм;

β – процент глицерина в прядильном растворе, %.

На основании вышеуказанных моделей была построена модель, описывающая влияние расхода формовочного раствора и содержания в нем функционального компонента глицерина на среднее значение диаметра D получаемых волокон:

$$D = d + \Delta d = 138 + 24 \cdot Q + \frac{270}{Q^3} \cdot \frac{\beta}{12 + \beta^2}. \quad (8)$$

Отклонение расчетных данных от результатов измерений не превышает 6 %, а в восьми опытах из девяти – составляет менее 3 %.

Для обоснования закона распределения нановолокон по диаметру выдвинута гипотеза, что если рассматривать процесс расщепления струи прядильного раствора по аналогии с процессом дробления частиц в других отраслях производства, то стабильным этот процесс можно считать в случае доказанного соответствия распределения диаметров нановолокон логнормальному закону. Для исследованных образцов, содержащих 14 % ПВС с добавлением от 0 до 7 % глицерина при трех значениях расхода прядильного раствора 1,0, 1,3 и 1,6 мл/ч, соответствие закона распределения диаметров волокон логнормальному закону подтвердилось. Наблюдалась правосторонняя асимметрия, в большинстве образцов она является незначительной и не превышает 0,25 (рисунок 5).

В четвертой главе проводилась оценка свойств водорастворимых нановолокнистых материалов, среди которых можно выделить разрывную нагрузку и удлинение, адгезионную прочность соединения с подложкой, а также профиль растворения, оцениваемый для биodeградирующих материалов, который определяется в основном составом формовочного раствора.

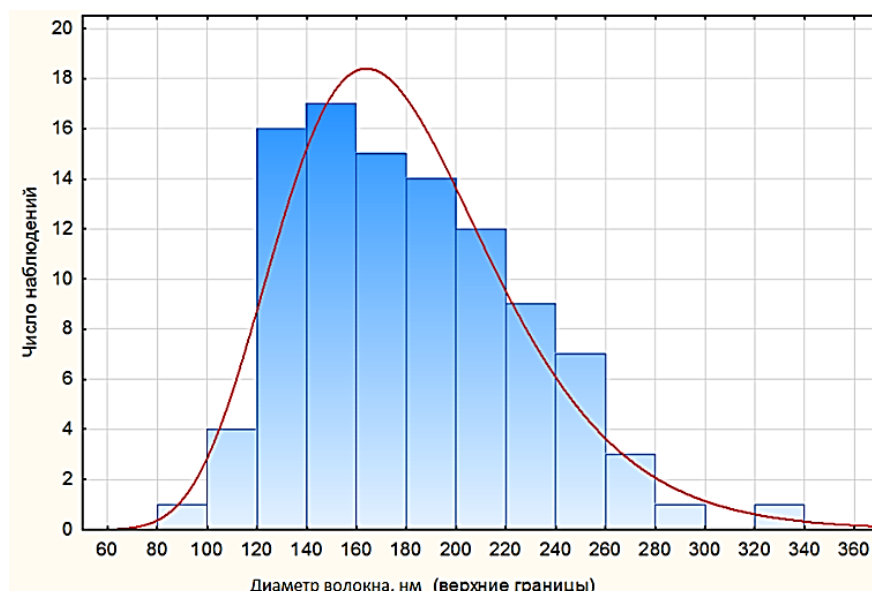
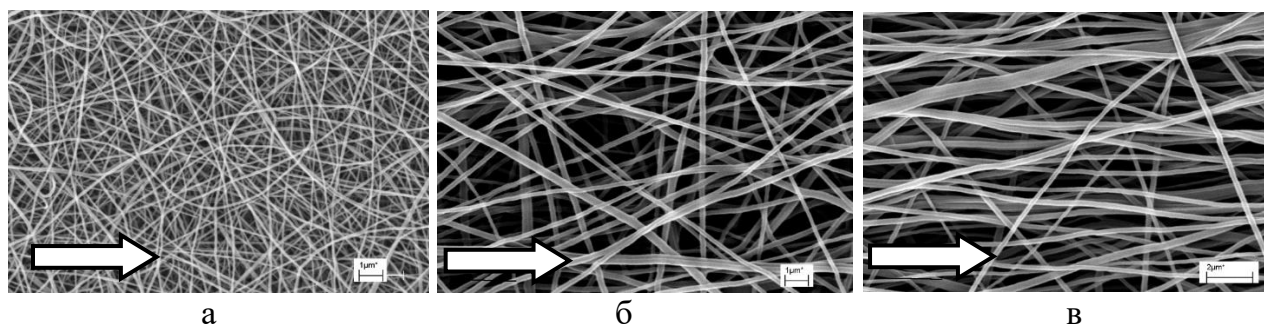


Рисунок 5 – Гистограммы логнормального распределения диаметров волокон из раствора ПВС с добавлением 7 % глицерина

Осуществлена оценка адгезии электроформованного нановолокнистого покрытия к материалу подложки с использованием автоматизированной разрывной машины Time WDW-20E. При добавлении глицерина процесс снятия нановолокнистого материала с бумаги существенно стабилизируется, а сила сопротивления отслаиванию снижается. В исследуемом временном диапазоне, соответствующем углу отслаивания материала $85-95^\circ$, не наблюдается существенных колебаний прикладываемой силы. Данный факт объясняется тем, что глицерин абсорбирует излишки неиспарившейся влаги и таким образом предотвращает местное налипание покрытия на подложку из-за неравномерного распределения в материале.

Установлено влияние частоты вращения осадительного электрода на ориентацию электроформованных нановолокон, для чего произведена наработка материалов при трех значениях частоты вращения коллектора: 200 мин^{-1} , 1100 мин^{-1} и 2000 мин^{-1} . Изображения структуры полученных образцов представлены на рисунке 6.



а – 200 мин^{-1} ; б – 1100 мин^{-1} ; в – 2000 мин^{-1}

Рисунок 6 – Изображения структуры нановолокнистых материалов ($\times 15000$), выработанных при различной частоте вращения коллектора

С увеличением частоты вращения коллектора происходит заметное повышение ориентации волокон вдоль направления окружной скорости коллектора. Так, при увеличении частоты с 200 до 2000 мин⁻¹ среднее значение угла наклона волокон относительно направления вращения коллектора уменьшилось практически в два раза (таблица 1).

Полученные образцы визуально отличались друг от друга. Образец, выработанный при минимальной частоте вращения коллектора, характеризовался матовой поверхностью, а с увеличением скоростного режима образцы приобретали блеск, что также объясняется повышением степени ориентации волокон в их структуре. При этом разрывная нагрузка материала существенно повышается: с 51,6 сН до 138,4 сН, то есть в 2,7 раза, что практически соответствует увеличению в 3 раза доли волокон, отклоняющихся от направления вращения коллектора на величину от 0 до 20°.

Таблица 1 – Влияние частоты вращения коллектора на параметры структуры электроформованного материала

Наименование показателя	Значение показателя		
Частота вращения коллектора, мин ⁻¹	200	1100	2000
Диаметр волокна, нм	180,1	175,7	182,2
Коэффициент вариации по диаметру, %	30,6	23,1	28,7
Средний угол наклона волокна относительно направления вращения коллектора, град.	46,3	39,4	23,7
Количество волокон, располагающихся:			
в продольном направлении (0–20°), %	22	33	65
в поперечном направлении (70–90°), %	22	15	6

Проведено исследование влияния стерилизационной обработки на свойства нановолокнистых материалов, для чего наработанные образцы были подвергнуты радиационной обработке в научном учреждении «ОИЭЯИ-Сосны» с использованием закрытых радионуклидных источников гамма-излучения кобальт-60.

Установлено, что при радиационной обработке нановолокнистых материалов повышалась их гладкость и адгезия к подложке, снижалась наэлектризованность и деформация при эксплуатации, снятие их не вызывало существенных затруднений и происходило равномерно. Установлено, что доза радиации не оказывает существенного влияния на профиль растворения нановолокнистого материала: растворение в местах контакта с водой происходило с одинаковой скоростью, капля растекалась относительно равномерно. По сравнению с необработанным материалом площадь растекания капли при 16,1 кГр уменьшилась на 7 %, при 26,7 кГр на 25 %, при 53,5 кГр на 27 %, что свидетельствует о наличии сшивки полимера в образцах. Таким образом, можно заключить, что для стерилизации медицинских нановолокнистых материалов может быть рекомендована радиационная обработка с дозой облучения 16,1 кГр.

Пятая глава посвящена разработке ассортимента нановолокнистых материалов, получаемых методом электроформования для нужд медицины и косметологии. Можно выделить следующие виды электроформованных нановолокнистых структур:

1. Однослойные однокомпонентные нановолокнистые материалы, получаемые из волокон без включения в них дополнительных компонентов, где полимер выступает основным терапевтическим средством.

2. Однослойные нановолокнистые материалы с включенным функциональным компонентом, структура которых позволяет обеспечить медленное и постепенное его выделение, что обуславливает хорошую впитываемость и возможность точно рассчитать дозировку.

3. Многослойные материалы, получение которых целесообразно в следующих случаях:

- для создания изделий, применение которых делает осуществимым последовательное выделение активных веществ в соответствии с принципом доставки лекарств;
- для создания легко снимаемого с подложки нановолокнистого материала в случае высокой адгезии слоя, состав которого обеспечивает достижение требуемой терапевтической функции;
- при создании нановолокнистых структур, которые обеспечивают инкапсулирование активных веществ, характеризующихся достаточно высокой летучестью.

Предложены технологические рекомендации для получения ассортимента изделий из электроформованных нетканых нановолокнистых материалов, а также параметры эффективного процесса электроформования для создания основных наноструктурных изделий: нановолокнистого материала с механизмом доставки лекарств для производства основных наноструктурных медицинских изделий, а также рекомендации по их упаковке, хранению и транспортировке.

Разработаны рекомендации по наработке гемостатической медицинской пленки для использования в хирургии. В качестве волокнообразующего полимера при проведении исследований использовался поливиниловый спирт марки Arkofil, а в качестве гемостатических компонентов были выбраны хлорид железа FeCl_3 и хлорид алюминия AlCl_3 .

Экспериментально обоснован выбор способа приготовления прядильного раствора из 14 % ПВС с 1,7 % хлорида алюминия и 0,8 % хлорида железа и влияние его на структуру и морфологию получаемого материала. На рисунке 7 представлено изображение структуры нановолокнистого материала при увеличении в 15000 раз, выработанного из растворов ПВС Arkofil с добавлением активного компонента.

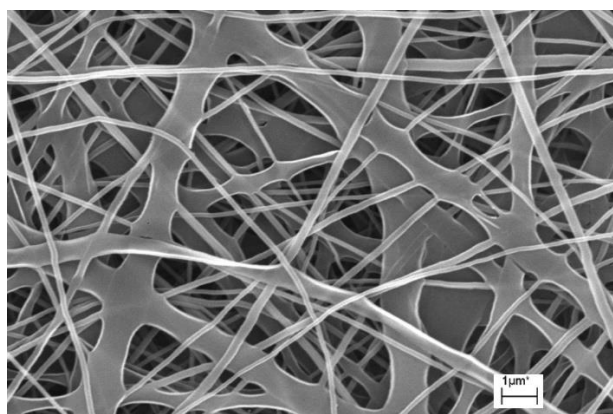


Рисунок 7 – Изображение структуры гемостатической пленки (×15000)

Проведены испытания полученных гемостатических пленок на биологических объектах, показавшие эффективность их использования для достижения гемостаза. Рекомендации по применению полученной пленки могут быть разработаны после прохождения клинических исследований для использования в хирургии и проведения последующей процедуры регистрации и экспертизы медицинского изделия.

Предложены рекомендации по получению многослойных нановолокнистых материалов методом электроформования: двухслойного материала со сниженной адгезией к подложке и различным профилем растворения на основе 14%-го раствора ПВС и 10%-го раствора полилактида в хлороформе (рисунок 8 а); нановолокнистого материала на основе 14%-го раствора ПВС с инкапсулированным маслом розового дерева (рисунок 8 б), двухслойного нановолокнистого материала, нижний слой которого был наработан из ПВС с добавлением глицерина, а верхний – из смеси раствора ПВС и раствора фиброина шелка на основе этилового спирта, дистиллированной воды и хлорида кальция. Проведены исследования структуры и морфологии полученных многослойных нановолокнистых материалов.

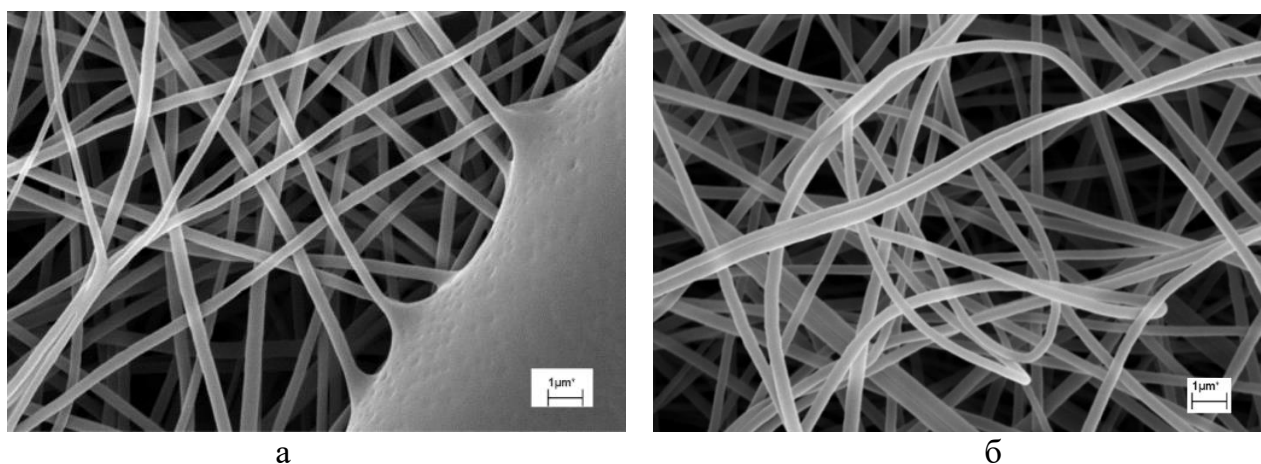


Рисунок 8 – Изображения структуры нановолокнистых материалов на основе поливинилового спирта (×15000)

Разработаны рекомендации по получению изделий из нановолокнистых материалов из растворов на основе ПВС. Технологический процесс включает следующие этапы:

- 1) приготовление одного или нескольких формовочных растворов;
- 2) электроформование нановолокнистого материала на установке;
- 3) разрезание материала для получения изделий заданного размера;
- 4) упаковка изделия;
- 5) радиационная стерилизация изделия (при необходимости).

Предложены рациональные параметры эффективного процесса электроформования нановолокнистого материала с механизмом доставки лекарств для производства основных наноструктурных медицинских изделий: нанопленки, нанопористой сетки, четко структурированного нановолокнистого материала, материала с гемостатическими компонентами и с включением летучих веществ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации.

1. Определено влияние состава прядильных растворов, вида используемого полимера, содержания глицерина на их физико-химические свойства и протекание процесса электроформования. Разработаны составы прядильных растворов, содержащих от 10 до 16 % поливинилового спирта с добавлением до 10 % глицерина, а также определены параметры стабильного протекания процесса электроформования нановолокнистых материалов: электрические потенциалы эмиттера и коллектора соответственно, +28 – +29 кВ и -9 кВ, расстояние от эмиттера до коллектора 10–12 см, расход волокнообразующего полимера 1,3–1,6 мл/ч, время электроформования – не менее 15 мин [1 – А, 2 – А, 9 – А, 10 – А, 11 – А, 12 – А, 13 – А, 14 – А, 15 – А, 16 – А, 17 – А, 18 – А, 22 – А, 23 – А, 24 – А, 31 – А, 32 – А, 33 – А].

2. Получены математические зависимости и закономерности, описывающие влияние расхода и состава прядильных растворов на структуру и свойства электроформованных материалов, а также математическая модель, описывающая влияние расхода прядильного раствора на основе поливинилового спирта и содержания в нем глицерина на диаметр получаемых волокон [6 – А, 7 – А, 8 – А, 25 – А, 26 – А, 27 – А, 28 – А, 29 – А, 32 – А].

3. В результате анализа структуры нановолокнистых материалов научно обоснована и экспериментально доказана гипотеза о том, что при стационарном процессе расщепления струи при электроформовании распределение полимерных нановолокон по диаметру подчиняется логнормальному закону. Установлено, что при увеличении частоты вращения коллектора в диапазоне от 200 до 2000 мин⁻¹ повышается степень ориентации нановолокон в структуре получаемого материала, что приводит к соответствующему увеличению его разрывной нагрузки и снижению удлинения при разрыве [3 – А, 4 – А, 19 – А, 20 – А, 28 – А, 29 – А].

4. В результате исследования полученных нановолокнистых материалов на биологических объектах доказана эффективность использования нановолокнистого нетканого материала с механизмом доставки лекарств на основе 14 % поливинилового спирта, 1,7 % хлорида алюминия и 0,8 % хлорида железа для достижения гемостаза. Выявлено, что радиационная стерилизационная обработка водорастворимых нановолокнистых материалов для применения в медицине обеспечивает повышение их эксплуатационных характеристик и устранение рисков микробного инфицирования тканей пациента [5 – А, 21 – А, 27 – А, 29 – А, 30 – А].

Рекомендации по практическому использованию результатов.

1. Предложены технологические рекомендации по получению электроформованных нановолокнистых материалов из поливинилового спирта с помощью прядильных головок различных конструкций. Результаты внедрены в учебный процесс УО «ВГТУ» [Акт об использовании (внедрении) НИР от 11.09.2019]. Разработанные рекомендации применимы для промышленного производства электроформованных материалов, покрытий и структур для рас-

ширения ассортимента материалов медицинского и косметологического назначения из водорастворимых полимеров с возможной адаптацией технологических режимов для более высокопроизводительных установок.

2. Разработана и внедрена в учебный процесс УО «ВГТУ» методика приготовления прядильных растворов на основе поливинилового спирта с добавкой глицерина для электроформования, которая включает в себя предложенный комплекс экспериментов, позволяющих выбрать оптимальный качественный и количественный химический состав полимерной композиции для обеспечения стабильного протекания процесса электроформования при производстве нанокompозитных материалов медицинского назначения [Акт об использовании (внедрении) НИР от 11.06.2020].

3. Предложены рекомендации по выбору режимов процесса электроформования нановолокнистых материалов с учетом требований к их структуре и свойствам, которые включают в себя выбор параметров процесса электроформования для получения нановолокнистых материалов с различной структурой и прочностными характеристиками [Акт об использовании (внедрении) НИР от 17.11.2021].

4. Подан патент на разработанную гемостатическую медицинскую пленку, прошедший этап первичной экспертизы. Рекомендации по применению гемостатической медицинской пленки могут быть составлены после прохождения клинических исследований для использования в хирургии и проведения последующей процедуры регистрации и экспертизы медицинского изделия.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи в научных рецензируемых журналах:

1 – А. Рыклин, Д. Б. Определение рациональных режимов электроформования с использованием прядильных головок различной конструкции / Д. Б. Рыклин, В. М. Азарченко, М. А. Демидова // Химические волокна. – 2019. – № 4. – С. 13–15.

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

3 – А. Демидова, М. А. Анализ влияния скоростного режима электроформования на структуру и свойства нановолокнистых материалов / М. А. Демидова, Д. Б. Рыклин // Вестник Витебского государственного технологического университета. – 2021. – № 2 (41). – С. 9–15.

4 – А. Рыклин, Д. Б. Обоснование закона распределения нановолокон по диаметру в материалах, полученных методом электроформования / Д. Б. Рыклин, М. А. Демидова, В. М. Азарченко, К. В. Скродкая // Технология текстильной промышленности. Известия высших учебных заведений. – 2021. – № 4 (394). – С. 121–128.

5 – А. Демидова, М. А. Анализ способов приготовления прядильных растворов для получения гемостатических пленок методом электроформования / М. А. Демидова, Д. Б. Рыклин, В. А. Молоток, С. Э. Ржеусский // Технология текстильной промышленности. Известия высших учебных заведений. – 2022. – № 4 (400). – С. 115–121.

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

7 – А. Демидова, М. А. Влияние рецептуры прядильного раствора на структуру нановолокнистых материалов, полученных методом электроформования / М. А. Демидова, Д. Б. Рыклин // Технология текстильной промышленности. Известия высших учебных заведений. – 2022. – № 6 (402). – С. 74–80.

8 – А. Демидова, М. А. Оценка адгезии нановолокнистых материалов к подложкам / М. А. Демидова, Д. Б. Рыклин, А. А. Кузнецов // Фан ва технологиялар Таракиети (Развитие науки и технологий). – 2023. – № 1. – С. 236–243.

Статьи в других научных журналах:

9 – А. Демидова, М. А. Влияние композиций электроформовочных растворов на их основные свойства / М. А. Демидова // Материалы и технологии. – 2022. – № 2 (10). – С. 48–53.

Материалы конференций:

10 – А. Рыклин, Д. Б. Оценка стабильности свойств растворов поливинилового спирта, применяемых для электроформования нановолокнистых материалов / Д. Б. Рыклин, В. М. Азарченко, М. А. Демидова // Всероссийская научно-практическая конференция «Научные исследования и разработки в области дизайна и технологий» : сборник материалов, Кострома, 4–5 апреля 2019 г. / ФГБОУ ВО Костромской государственный университет. – Кострома, 2019. – С. 167–169.

11 – А. Демидова, М. А. Определение рациональных режимов электроформования с использованием коаксиальной прядильной головки / М. А. Демидова, Д. Б. Рыклин, В. М. Азарченко // Материалы докладов 52-ой Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов : в 2 т., Витебск, 24 апреля 2019 г. / УО «ВГТУ». – Витебск, 2019. – Т. 2. – С. 289–292.

12 – А. Азарченко, В. М. Определение рациональных режимов получения нановолокнистых материалов методом электроформования на установке Fluidnatek LE 50 / В. М. Азарченко, М. А. Демидова // Национальная молодежная научно-техническая конференция «Молодые ученые – развитию национальной технологической инициативы (ПОИСК-2019)», Иваново, 24–26 апреля 2019 г. / Текстильный институт ФГБОУ ВПО «ИВГПУ». – Иваново, 2019. – С. 7–10.

13 – А. Demidova, M. A. Research of features of the coaxial electrospinning of nanofibers / M. A. Demidova, D. B. Ryklin // Материалы IV Международной научно-практической конференции «Education and science in the 21st century», Витебск, 18 октября 2019 г. / УО «ВГТУ». – Витебск, 2019. – С. 10–12.

14 – А. Рыклин, Д. Б. Оптимизация процесса электроформования на установке Fluidnatek LE-50 / Д. Б. Рыклин, В. М. Азарченко, М. А. Демидова // Материалы международного научно-технического симпозиума «Энергоресурсоэффективные экологически безопасные технологии и оборудование» в рамках «Косыгинского форума – 2019» : сборник научных трудов : сборник материалов, Москва, 29 октября – 1 ноября 2019 г. / Российский государственный университет им. Косыгина. – Москва, 2019. – Т. 1. – С. 149–152.

15 – А. Демидова, М. А. Определение влияния этилового спирта на процесс электроформования нановолокнистых материалов на установке Fluidnatek LE-50 / М. А. Демидова, В. М. Азарченко, Д. Б. Рыклин // Международная научно-техническая конференция «Инновационные технологии в текстильной и легкой промышленности» : сборник статей, Витебск, 13–14 ноября 2019 г. / УО «ВГТУ». – Витебск, 2019. – С. 43–45.

16 – А. Рыклин, Д. Б. Оценка влияния добавки глицерина в прядильный раствор на структуру электроформованных материалов / Д. Б. Рыклин, Н. Н. Ясинская, М. А. Демидова, В. М. Азарченко // Сборник материалов XXI Международного научно-практического форума SMARTEX-2020 «Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы», Иваново, 20–23 октября 2020 г. / Текстильный институт ФГБОУ ВПО «ИВГПУ». – Иваново, 2020. – № 1. – С. 88–93.

17 – A. Demidova, M.A. Determination of rational modes of obtaining nanofibrous materials by electrospinning on the Fluidnatek LE-50 / M. A. Demidova, D. B. Ryklin // Материалы V Международной научно-практической конференции «Education and science in the 21st century», Витебск, 29 октября 2020 г. / УО «ВГТУ». – Витебск, 2020. – С. 13–15.

18 – А. Демидова, М.А. Определение влияния параметров электроформования на равномерность нановолокнистого покрытия / М. А. Демидова, В. М. Азарченко, Д. Б. Рыклин // Международный научно-практический симпозиум «Прогрессивные технологии и оборудование: текстиль, одежда, обувь» : сборник материалов, Витебск, 3 ноября 2020 г. / УО «ВГТУ». – Витебск, 2020. – С. 29–32.

19 – А. Новицкая, В. А. Оценка специфической активности пленки медицинской с солями железа (III) и алюминия хлорида / В. А. Новицкая, С. В. Гвоздев, М. А. Демидова и [др.] // Сборник материалов 73-й научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Актуальные вопросы современной медицины и фармации», Витебск, 21–22 апреля 2021 г. / УО «ВГМУ». – Витебск, 2021. – С. 157–160.

20 – А. Демидова, М. А. Выбор марки поливинилового спирта для получения нановолокнистых материалов методом электроформования / М. А. Демидова, В. М. Азарченко, Д. Б. Рыклин // Материалы международной научно-практической конференции «Современные концепции обеспечения качества изделий хлопковой, текстильной и легкой промышленности» : сборник материалов, Наманган, 21–22 апреля 2021 г. / Наманганский Механико-технологический институт. – Наманган, 2021. – С. 78–81.

21 – А. Рыклин, Д. Б. Оценка адгезии нановолокнистых материалов к различным видам подложек / Д. Б. Рыклин, Н. В. Скобова, М. А. Демидова, В. М. Азарченко // Национальная молодежная научно-техническая конференция «Молодые ученые – развитию национальной технологической инициативы (ПОИСК-2021)», Иваново, 27–29 апреля 2021 г. / Текстильный институт ФГБОУ ВПО «ИВГПУ». – Иваново, 2021. – С. 31–34.

22 – А. Демидова, М. А. Выбор метода оценки адгезии нановолокнистых материалов / М. А. Демидова, В. М. Азарченко, Д. Б. Рыклин // Материалы докладов 54-й Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов : в 2 т., Витебск, 28 апреля 2021 г. / УО «ВГТУ». – Витебск, 2021. – Т. 2. – С. 199–200.

23 – А. Демидова, М. А. Выбор марки поливинилового спирта для получения биомедицинских электроформованных материалов / М.А. Демидова, В. М. Азарченко, Д. Б. Рыклин // Материалы XIV Всероссийской научно-практической студенческой конференции «России – творческую молодежь» : в 2 т., Камышин, 12–13 мая 2021 г. – Волгоградский государственный технический университет. – Камышин, 2021. – Т. 2. – С. 76–79.

24 – A. Ryklin, D. B. Influence of glycerin adding on the electrospun nanofibers diameter / D. B. Ryklin, M. A. Demidova, V. M. Azarchenko, N. N. Yasinskaya, N. V. Skobova // Материалы международной научно-технической конференции

«Инновации в текстиле, одежде и обуви (ИСТАИ-2021)», Витебск, 8–10 июня 2021 г. / УО «ВГТУ». – Витебск, 2021. – С. 030002-1–030002-8.

25 – А. Демидова, М. А. Получение гемостатических пленок методом электроформования / М. А. Демидова, В. А. Новицкая, Д. Б. Рыклин, С. В. Гвоздев // материалов XXI Международного научно-практического форума SMARTEX-2021 «Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы», Иваново, 12–14 октября 2021 г. / Текстильный институт ФГБОУ ВПО «ИВГПУ». – Иваново, 2021. – № 1. – С. 181–186.

26 – А. Рыклин, Д. Б. Получение многослойных нановолокнистых материалов методом электроформования / Д. Б. Рыклин, Н. Н. Ясинская, М. А. Демидова, В. М. Азарченко // Материалы международного научно-технического симпозиума «Повышение энергоресурсоэффективности и экологической безопасности процессов и аппаратов химической и смежных отраслей промышленности» в рамках 3-го Международного Косыгинского форума : в 2 т., Москва, 20–21 октября 2021 г. / Российский государственный университет им. Косыгина. – Москва, 2021. – Т. 2. – С. 168–172.

27 – А. Рыклин, Д. Б. Влияние параметров процесса электроформования на диаметр неоднородных нановолокон / Д. Б. Рыклин, М. А. Демидова, Н. Н. Ясинская, В. М. Азарченко, К. Э. Разумеев // Материалы международного научно-технического симпозиума «Современные инженерные проблемы ключевых отраслей экономики страны» в рамках 3-го Международного Косыгинского форума : в 3 т., Москва, 20–21 октября 2021 г. / Российский государственный университет им. Косыгина. – Москва, 2021. – Т. 3. – С. 42–47.

28 – А. Demidova, M.A. Assessment of adhesion of nanofiber materials / М. А. Demidova, D. B. Ryklin // Материалы VI Международной научно-практической конференции «Education and science in the 21st century», Витебск, 11 ноября 2021 г. / УО «ВГТУ». – Витебск, 2021. – С. 8–11.

29 – А. Демидова, М. А. Исследование структуры и свойств многослойных нановолокнистых материалов / М. А. Демидова, Д. Б. Рыклин // Научно-техническая конференция студентов, аспирантов и докторантов : в 2 т., Кишинев, 29–31 марта 2022. – Технический университет Молдовы. – Кишинев, 2022. – Т. 2. – С. 464–467.

30 – А. Демидова, М. А. Анализ структуры гемостатических пленок, полученных методом электроформования / М. А. Демидова, Д. Б. Рыклин // Национальная молодежная научно-техническая конференция «Молодые ученые – развитию национальной технологической инициативы (ПОИСК-2022)», Иваново, 26–28 апреля 2022 г. / Текстильный институт ФГБОУ ВПО «ИВГПУ». – Иваново, 2022. – С. 36–38.

31 – А. Демидова, М. А. Влияние параметров процесса электроформования на расход формовочного раствора поливинилового спирта / М. А. Демидова, Д. Б. Рыклин // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы: XXV Международный научно-практический форум SMARTEX-2022, 6–7 октября 2022 г. / Иваново: ИВГПУ. – Иваново, 2022. – С. 146–151.

32 – А. Рыклин, Д. Б. Влияние радиационной стерилизации на свойства нановолокнистых материалов / Д. Б. Рыклин, М. А. Демидова, И. И. Черников // Материалы Международной научно-технической конференции «Дизайн, технологии и инновации в текстильной и легкой промышленности) (ИННОВАЦИИ-2022), 16 ноября 2022 г. – Москва: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2022. – С. 36–39.

33 – А. Демидова, М. А. Разработка двухслойного нановолокнистого материала для косметологии / М. А. Демидова, Д. Б. Рыклин, И. И. Черников // Материалы международной научно-технической конференции «Инновации в текстиле, одежде и обуви (ИСТАИ-2022)», Витебск, 23–24 ноября 2022 г. / УО «ВГТУ». – Витебск, 2022. – С. 27–31.

РЕЗЮМЕ

Демидова Мария Александровна

Технология получения водорастворимых нановолокнистых материалов методом электроформования

Ключевые слова: нановолокнистые материалы, электроформование, структура, закон распределения, адгезия, растворимость

Цель работы: разработка новых видов водорастворимых нановолокнистых материалов различной структуры, получаемых методом электроформования, для использования в медицине и косметологии и технологических рекомендаций по их получению.

Методы исследования и использованная аппаратура: для получения неоднородных нановолокнистых материалов использовалась установка для электроформования Fluidnatek LE-50; для исследования свойств прядильных растворов применялись: вискозиметр ротационного типа RM 100 Plus, кондуктометр HANNA 8733, пикнометр. Исследование структуры образцов осуществлялось методом сканирующей электронной микроскопии с помощью микроскопа LEO 1420. Для оценки адгезии нановолокнистого покрытия к материалу подложки использовалась автоматизированная разрывная машина Time WDW-20E. Стерилизация образцов проводилась с использованием закрытых радионуклидных источников гамма-излучения кобальт-60.

Полученные результаты и их новизна: разработаны составы прядильных растворов для обеспечения стабильного процесса электроформования водорастворимых нановолокнистых материалов. Определено влияние состава прядильных растворов на их физические свойства, имеющие существенное значение при реализации процесса электроформования. Установлены математические зависимости и закономерности, описывающие влияние режимов электроформования и состава формовочных растворов на структуру и свойства электроформованных материалов. Разработаны технологические рекомендации по производству широкого ассортимента неоднородных нановолокнистых материалов медицинского и косметологического назначения.

Рекомендации по использованию: полученные результаты могут быть использованы для промышленного производства электроформованных материалов, покрытий и структур для расширения ассортимента материалов медицинского и косметологического назначения из водорастворимых полимеров.

Область применения: полученные результаты могут быть реализованы при производстве материалов медицинского и косметологического назначения.

РЭЗІЮМЭ

Дзямідава Марыя Аляксандраўна

Тэхналогія атрымання водарастваральных нанавалакністых матэрыялаў метадам электрофармавання

Ключавыя словы: нанавалакністыя матэрыялы, электрофармаванне, структура, закон размеркавання, адгезія, растваральнасць

Мэта работы: стварэнне новых відаў водарастваральных нанавалакністых матэрыялаў рознай структуры, атрыманых метадам электрофармавання, для выкарыстання ў медыцыне і касметалогіі і тэхналагічных рэкамендацый па іх атрыманні.

Метады даследавання і выкарыстаная апаратура: для атрымання неаднародных нанавалакністых матэрыялаў выкарыстоўвалася ўстаноўка для электрофармавання Fluidnatek LE-50; для даследавання ўласцівасцяў прадзільных раствораў ужываліся: вісказіметр ратацыйнага тыпу RM 100 Plus, кандуктометр HANNA 8733, пікнометр. Даследаванне структуры ўзораў ажыццяўлялася метадам сканавальнай электроннай мікраскапіі з дапамогай мікраскопа LEO 1420. Для вызначэння адгезіі нанавалакністага пакрыцця да матэрыялу падложкі выкарыстоўвалася аўтаматызаваная разрыўная машына Time WDW-20E. Стэрылізацыя праводзілася з выкарыстаннем закрытых радыенуклідных крыніц гама-выпраменьвання кобальт-60.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: распрацаваны саставы прадзільных раствораў для забеспячэння стабільнага працэсу электрофармавання водарастваральных нанавалакністых матэрыялаў. Вызначаны ўплыў саставу прадзільных раствораў на іх фізічныя ўласцівасці, што маюць важнае значэнне пры рэалізацыі працэсу электрофармавання. Устаноўлены матэматычныя залежнасці і заканамернасці, якія апісваюць уплыў рэжымаў электрофармавання і саставу фармовачных раствораў на структуру і ўласцівасці электрофармаваных матэрыялаў. Распрацаваны тэхналагічныя рэкамендацыі па вытворчасці шырокага асартыменту неаднародных нанавалакністых матэрыялаў медыцынскага і касметалагічнага прызначэння.

Рэкамендацыі па выкарыстанні: атрыманыя вынікі могуць быць скарыстаны для прамысловай вытворчасці электрофармаваных матэрыялаў, пакрыццяў і структур для пашырэння асартыменту матэрыялаў медыцынскага і касметалагічнага прызначэння з водарастваральных палімераў.

Вобласць прымянення: атрыманыя вынікі могуць быць рэалізаваны пры вытворчасці матэрыялаў медыцынскага і касметалагічнага прызначэння.

SUMMARY

Demidova Maria Alexandrovna

Technology for producing water-soluble nanofibrous materials by electrospinning

Key words: nanofibrous materials, electrospinning, structure, distribution law, adhesion, solubility

Aim of the research: development of new types of water-soluble nanofibrous materials of various structures obtained by electrospinning for medicine and cosmetology and technological recommendations for their production.

Research methods and equipment used: Fluidnatek LE-50 electrospinning machinery was used to obtain inhomogeneous nanofibrous materials; to study the properties of spinning solutions, the following were used: a rotational viscometer RM 100 Plus, a HANNA 8733 conductometer, pycnometers. The structure of the samples was studied by scanning electron microscopy using a LEO 1420 microscope. To assess the adhesion of the nanofibrous coating to the substrate material, a Time WDW-20E automated tensile testing machine was used. Samples were sterilized using closed radionuclide sources of cobalt-60 gamma radiation.

The obtained results and their novelty: compositions of spinning solutions have been developed to ensure a stable process of electrospinning of water-soluble nanofibrous materials. The influence of the composition of spinning solutions on their physical properties, which are essential in the implementation of the electrospinning process, is determined. Mathematical dependencies and regularities have been established that describe the influence of electrospinning modes and the composition of molding solutions on the structure and properties of electrospun materials. Technological recommendations for the production of a wide range of heterogeneous nanofibrous materials for medicine and cosmetology have been developed.

Recommendations for use: the obtained results can be used for the industrial production of electrospun materials, coatings and structures to expand the range of materials for medical and cosmetic purposes from water-soluble polymers.

Scope: the results obtained can be implemented in the production of materials for medical and cosmetic purposes.



**ДЕМИДОВА
МАРИЯ АЛЕКСАНДРОВНА**

**ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВОДОРАСТВОРИМЫХ
НАНОВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ
ЭЛЕКТРОФОРМОВАНИЯ**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности 05.19.02 – «Технология и первичная обработка
текстильных материалов и сырья»

Подписано к печати 14.11.2023. Формат 60×90 1/16. Усл. печ. листов 1,63.
Уч.-изд. листов 1,9. Тираж 80 экз. Заказ № 290.

Отпечатано на ризографе учреждения образования
«Витебский государственный технологический университет».
210038, Республика Беларусь, г. Витебск, Московский пр., 72.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/172 от 12 февраля 2014 г.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 3/1497 от 30 мая 2017 г.