

*На правах рукописи*



**Гайнутдинов Руслан Фаридович**

**НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
УПРАВЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯМИ КАЧЕСТВА  
МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ОДЕЖДЫ СПЕЦИАЛЬНОГО  
НАЗНАЧЕНИЯ**

2.6.16. Технология производства изделий текстильной и легкой промышленности

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

**Казань – 2024**

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет».

**Научный консультант:** **Хамматова Венера Васильевна**, доктор технических наук, профессор

**Официальные оппоненты:** **Бесшапошникова Валентина Иосифовна**, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)», профессор кафедры материаловедения и товарной экспертизы; **Киселев Михаил Владимирович**, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Костромской государственной университет», профессор кафедры автоматизации, микропроцессорной техники и технологии машиностроения;

**Ведущая организация:** **Гайсин Азат Фивзатович**, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет», профессор кафедры физики. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный химико-технологический университет», г. Иваново

Защита состоится «24» октября 2024 года в 12.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.312.12, созданного на базе ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», по адресу: 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, 68, зал заседаний Ученого совета, А-330.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» и на сайте [https://www.kstu.ru/event.jsp?id=158074&id\\_cat=141](https://www.kstu.ru/event.jsp?id=158074&id_cat=141).

Отзывы на автореферат и диссертацию в 2-х экземплярах с подписями, заверенными печатью, просим направлять по адресу: 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, 68, ФГБОУ ВО «КНИТУ», учёному секретарю диссертационного совета 24.2.312.12. В отзыве указываются фамилия, имя, отчество (полностью), ученая степень с указанием специальности, ученое звание, наименование организации и должность лица, представившего отзыв, с указанием структурного подразделения, почтовый адрес, телефон и адрес электронной почты (при наличии).

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор технических наук



Н.В.Тихонова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В условиях производственной деятельности все больший интерес вызывает проблема защиты человека от комплекса негативных факторов, а именно потока тепла и летящих раскаленных брызг, возникающих у сварщиков и металлургов, также воздействие агрессивных сред. Все большее значение приобретают исследования по созданию новых текстильных и кожевенных материалов для спецодежды на основе натуральных волокон и спилка кожевенного материала, а также повышению качества и конкурентоспособности выпускаемой продукции.

Наиболее значимыми показателями качества многофункциональных текстильных и кожевенных материалов для спецодежды (МТКМС), эксплуатируемых в производственных условиях, являются надежность, долговечность и стойкость к воздействию внешних сред. Одним из путей повышения показателей качества материалов легкой промышленности является придание им комплекса высоких физико-механических, гигиенических и защитных свойств (огнестойкости, устойчивости к воздействию агрессивных сред, биостойкости). Поэтому необходим системный подход к решению проблемы управления качеством материалов для спецодежды.

Для обеспечения комфортного выполнения трудовых обязанностей и с целью исключения вреда здоровью промышленные предприятия обеспечивают работников спецодеждой, отвечающей строгим критериям безопасности. Поэтому создание МТКМС, отвечающих комплексу показателей качества, является важной и актуальной проблемой.

Существуют различные способы защиты рабочей одежды из натуральных материалов, но во многих из них в составе применяются химические волокна. Обработка материалов спецодежды маслостойкой водоотталкивающей (МВО), светопрозрачной комбинированной пропиткой повышенной водоупорности и огнестойкости (СКППВО), огнестойкой особопрозрачной (ООП) пропиткой, а также коллоидным раствором наночастиц серебра (КРНС), позволяет создать многофункциональный материал как с гидрофобной, так и бактерицидной поверхностью. Производство высококачественной специальной одежды из так называемых МТКМС, которые одновременно удовлетворяют множеству требований, часто взаимоисключающих друг друга, является актуальным и имеет первостепенное значение. Решение этой проблемы может быть достигнуто за счет совершенствования метода пропитки материалов, а также технологии наноструктурирования потоком неравновесной низкотемпературной плазмы (ННТП) пониженного давления и наномодифицирования КРНС, что позволит проводить не только поверхностную, но и объемную обработку, обеспечить улучшение комплекса показателей качества материалов и готовых изделий. Все вышесказанное подтверждает актуальность темы диссертационного исследования.

Большой вклад в развитие теории и практики использования технологий для обработки МТКМС внесли исследования ведущих российских ученых – В.К. Афанасьева, А.Б. Гильман, Б.Л. Горберга, А.И. Максимова, Б.Н. Мель-

никова, С.Ф. Садовой, Л.В. Шарниной, И.Ш. Абдуллина, Л.Н. Абуталиповой, В.И. Бешпапошниковой и многих других. Они также доказали целесообразность использования плазменной технологии, которая основана на решении проблемы регулирования и усиления технологического процесса отделки текстильных и кожевенных материалов. Методы оценки свойств текстильных материалов изложены в работах А.Г. Севостьянова, С.Д. Николаева, Ю.С. Шустова, Л.А. Осипенко, А.В. Курденковой, Л.В. Лариной и других исследователей.

Настоящая работа является продолжением научного направления, связанного с теоретическим обоснованием и применением плазменной технологии в производстве МТКМС. В этой связи исследования, направленные на разработку научно-технологических основ управления качеством наноструктурированных и наномодифицированных МТКМС с использованием потока ННТП пониженного давления и КРНС, являются своевременными и становятся наиболее перспективным сегментом рыночной экономики. Результаты исследования позволяют разработать МТКМС с высокими показателями качества, повысить устойчивость к тепловым потокам и физико-химическим воздействиям.

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» на основе материалов исследований, выполненных в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 - 2021 годы» по теме «Разработка технологии управления микроструктурой натуральных материалов легкой промышленности для отраслей экономики Российской Федерации (энергетического, строительного, нефтехимического и оборонно-промышленного комплекса)» (соглашение № 14.577.21.0019 от 05.06.2014); поисковой НИР «Создание научных основ и разработка новых высокоэффективных технологий модификации материалов различной физической природы, включая формирование наноструктур, электрофизическими и электрохимическими методами» (Государственный контракт № 2196 от 01.02.2014), а также в рамках гранта № 075-15-2021-699 Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по развитию материально-технической инфраструктуры Центра коллективного пользования научным оборудованием «Наноматериалы и нанотехнологии» ФГБОУ ВО «КНИТУ» (2021-2025гг.).

**Цель работы** - разработка научных основ и технологических подходов к управлению показателями качества материалов текстильной и легкой промышленности, используемых в одежде специального назначения.

**Для достижения поставленной цели решены следующие научно-исследовательские и практические задачи:**

1. Провести анализ, систематизацию и научное обоснование подходов повышения уровня качества материалов текстильной и легкой промышленности для создания МТКМС на основе комплексной технологии плазменного наноструктурирования потоком ННТП пониженного давления и наномодифицирования КРНС.

2. Теоретически обосновать возможность применения объектов, методов и методик исследований МТКМС, обеспечивающих комплексную оценку показателей качества образцов.

3. Разработать научно обоснованные теоретические и экспериментальные подходы к управлению показателями качества объектов исследования, определяющих работу и защитные свойства МТКМС в результате применения комплексных технических решений их отделки.

4. Экспериментально исследовать и обосновать возможности применения наноструктурированных и наномодифицированных материалов для производства спецодежды.

5. Разработать физическую и математическую модели наноструктурирования и наномодифицирования материалов текстильной и легкой промышленности для установления основных закономерностей повышения качества МТКМС.

6. Провести опытные испытания спецодежды в производственных условиях, оценить уровень показателей качества образцов наноструктурированных и наномодифицированных МТКМС, провести экономическое обоснование использования разработанных инновационных методов для изготовления материалов текстильной и легкой промышленности.

**Научная новизна работы** заключается в разработке теоретических основ и экспериментальных методов, и методики реализации комбинированной технологии наноструктурирования потоком ННТП пониженного давления и наномодифицирования КРНС; научных положений, позволяющих управлять структурой МТКМС за счет регулирования параметров плазменного потока, прогнозирования и оценки качественных показателей образцов.

При этом впервые получены следующие научные результаты:

1. Установлена взаимосвязь показателей структуры и качества исходных компонентов новых МТКМС, позволяющая определить количественные характеристики продукции и обеспечить оценку их уровня качества.

2. Предложен и реализован научно–обоснованный подход к модификации материалов для текстильной и легкой промышленности путем пропитки новым композитным составом с использованием комплексной технологии наноструктурирования МТКМС потоком ННТП пониженного давления и наномодифицирования КРНС, направленный на улучшение показателей качества и конкурентоспособности отечественной продукции.

3. Определены оптимально эффективные технологические параметры процесса комплексного воздействия потоком ННТП пониженного давления и наномодифицировании КРНС, которые обеспечивают высокие показатели качества МТКМС и готовых изделий.

4. Доказано интенсифицирующее действие потока ННТП пониженного давления, приводящее к изменению пористой структуры МТКМС из натуральных волокнообразующих полимеров. Установлены оптимальные параметры плазменного воздействия, приводящие к повышению показателей качества новых МТКМС.

5. Предложено новое техническое решение пропитки комплексным составом (МВО+ООП+КРНС), одновременно повышающей как гидрофобность и огнестойкость материалов спецодежды, так и их гигроскопичность и бактерицидность.

6. Экспериментально доказано, что под воздействием ННТП происходит наноструктурирование МТКМС на толщину до 0,15 нм, а за счет КРНС на поверхности волокон концентрируется плотный слой атомов металла (максимально 100 нм), повышая физико-механические и защитные свойства от агрессивных сред и бактерий, которые на порядок превосходят контрольные образцы.

7. Впервые разработаны новые методы оценки общей пористости многофункциональных текстильных материалов и спилка кожевенного материала с использованием объемно-взвешенного метода определения кажущейся и истинной плотности, а также толщины материалов. Разработанный метод подтвердил увеличение общей пористости от 41% до 61 % и средней толщины материалов от 15 до 20 % по сравнению с контрольными образцами.

8. Впервые установлено, что максимальная глубина проникновения атомов плазмообразующего газа в поверхностный слой гидрофобной и бактерицидной пленки, состоящей из пропитки ВО и КРНС составляет до 18 мкм, при этом около 95% атомов плазменного газа задерживается в слое толщиной 10 мкм при определенных условиях обработки потоком ННТП пониженного давления.

9. Теоретически обоснована и реализована проблема увеличения размера внутреннего объема пор волокнистых материалов за счет плазменной обработки микро- и нанопор потоком ННТП пониженного давления и КРНС, что позволило разработать физическую и математическую модели наноструктурирования и наномодифицирования пористой структуры материалов.

**Теоретическая и практическая значимость.** Теоретическая значимость результатов исследований обоснована решением научной проблемы разработки нового подхода к управлению показателями качества МТКМС за счет комбинированной технологии наноструктурирования потоком ННТП пониженного давления и воздействия комплексного состава пропитки (МВО+ООП+КРНС) на капиллярно-пористую структуру материалов, а также сформулированными теоретическими представлениями эффективной адсорбции комплексного состава пропитки при отделочных операциях, математической моделью прогнозирования поведения современных ТМС и КМС различных структур под действием условий обработки потоком ННТП пониженного давления и КРНС, которые воздействуют не только на поверхность МТКМС, но также и на нити и волокна, расположенные в глубине, что объясняется эффектом объемной обработки пористых материалов при которых повышаются физико-механические и защитные свойства.

Практическая значимость исследований заключается в следующем:

1. Разработан технологический процесс производства новых наноструктурированных и наномодифицированных МТКМС обосновывает выбор ре-

жимов воздействия потока ННТП пониженного давления и КРНС, позволяющих повысить показатели качества образцов спецодежды.

2. Впервые разработаны наноструктурированные и наномодифицированные МТКМС, которые обеспечивают комбинированную защиту работников не только от теплового потока и расплава металла, но и брызг агрессивных кислот, щелочей, а также действия бактерий и грибов.

3. Впервые разработан новый ассортимент отечественных МТКМС с показателями качества, превышающими в 1,5 раза контрольные образцы. Установлено, что наноструктурированные и наномодифицированные МТКМС сохраняют водоотталкивающие свойства поверхности тканей и кожи, а также гигроскопические свойства спецодежды в течение двух лет их эксплуатации.

4. Получены аналитические показатели надежности и эксплуатационные показатели наноструктурированных текстильных материалов спецодежды. Определены показатели стойкости к воздействию агрессивных сред: в парусине устойчивость к кислотам возросла на 34-39 %; в шинельном сукне на 39-45%, а в льносодержащей ткани устойчивость к щелочам увеличилась на 12-39%, по сравнению с контрольными образцами.

5. Установлено, что наноструктурированный спилкок кожаного материала характеризуется повышением: предела прочности на 33%, удлинения при растяжении под напряжением 10 МПа на 36%, стойкости к истиранию на 16%, влагоотдачи и гигроскопичности на 30%, устойчивости окраски к сухому и мокрому трению на 100%, по сравнению с контрольными образцами. Это открывает возможность управлять показателями качества материалов, за счет варьирования параметрами обработки.

6. Впервые установлено, что использование наноструктурированных и наномодифицированных МТКМС позволяет продлить срок службы спецодежды с одного года до двух лет, в производственных условиях. Уровень качества разработанных МТКМС по надежности и эксплуатационным показателям в 5-7 раз превышает аналоги, что подтверждается результатами мониторинга комплексной оценки качества образцов.

7. Разработаны технологии наноструктурирования потоком ННТП пониженного давления и наномодифицирования КРНС, позволяющие обеспечить высокие показатели качества готовых изделий спецодежды.

8. Экспериментально подтверждены результаты мониторинга комплексных оценок качества спецодежды из наноструктурированных и наномодифицированных МТКМС в производственных условиях. Установлено, что новый ассортимент материалов позволяет продлить срок службы спецодежды до двух лет.

9. Разработанные инновационные технологии наноструктурирования и наномодифицирования МТКМС прошли опытно-промышленные испытания на АО «КазХимНИИ» (г. Казань) и внедрены на предприятия: ЗАО «Серпуховский кожевенный завод «Труд» (г. Серпухов); ООО «Рыбинский кожевенный завод» (г. Рыбинск); ООО «СОФТСТИЧ-М» (г. Москва); ООО «Эс-Дизайн» (г. Москва) и научно-производственное объединение «Программируемые композиции» (г. Кострома).

По результатам диссертационного исследования изготовлены контрольные и опытные образцы спецодежды из наноструктурированных и наномодифицированных МТКМС в количестве 200 единиц на ООО «Швейная мастерская Ирэн» (г. Казань), которые прошли опытную носку на ООО «Меткас» и ООО «ДороТех» (г. Казань).

Определен экономический эффект от внедрения наноструктурированных и наномодифицированных материалов для рабочей спецодежды в первые два года составляет 22,6 млн. рублей (18038 пог. метров ТМС и 7454 м<sup>2</sup> КМС) за счет повышения уровня качества образцов спецодежды. Срок окупаемости производства и реализации многофункциональной спецодежды составляет три года.

**Объектом исследования** являются текстильные материалы: парусина полульняная из волокон (хлопка и льна) и сукно шинельное из волокон (шерсти и полиэфира), а также спилкок кожевенного материала.

**Предметом исследования** являются методы управления показателями качества суровых и расшлихтованных текстильных материалов, и спилка кожевенного материала в процессах их наноструктурирования потоком ННТП пониженного давления, а также наномодифицирования КРНС и пропитки комплексным составом (МВО+ООП+КРНС).

**Экспериментально-теоретические исследования** выполнялись с применением методов: стандартных оценок показателей качества образцов МТКМС, микроскопического исследования, физико-химического анализа (ИК-спектроскопия, ионно-пучковый метод, рентгеноструктурный анализ и др.); математического планирования экспериментов с использованием уравнения Монте-Карло и системы программирования «MatLab». Обработка результатов проводилась на ПЭВМ с использованием методов математической статистики и регрессионного анализа. Оптимизация параметров технологических процессов осуществлялась в программе «Statistica 10.0». Погрешность результатов оценена с помощью методов статистической обработки экспериментальных данных при доверительной вероятности 0,97.

Измерения осуществлялись в соответствии с нормативно-технической документацией в научных лабораториях Центра коллективного пользования «Нанотехнологии и наноматериалы» ФГБОУ ВО «КНИТУ», аккредитованного 22.06.2013г. № Росс RU 0001. 517413.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Теоретическое обоснование выбора показателей качества МТКМС, позволяющих определить количественные характеристики свойств выпускаемой спецодежды и обеспечить оценку их уровня качества.

2. Теоретическое и экспериментальное обоснование технологий наноструктурирования МТКМС потоком ННТП пониженного давления и наномодифицирования КРНС, направленных на улучшение их качественных показателей.

3. Результаты экспериментальных исследований зависимости защитных свойств МТКМС от режимов плазменного воздействия и комплексной

пропитки, позволяющих обеспечить высокие показатели качества готовых изделий.

4. Экспериментальные исследования, устанавливающие воздействие потока ННТП пониженного давления, приводящее к изменению пористой структуры МТКМС из натуральных волокнообразующих полимеров, а также повышению надежности, эксплуатационных показателей и показателей стойкости МТКМС.

5. Инновационное техническое решение увеличения гидрофобных свойств материалов за счет наноструктурирования МТКМС и использования композитных пропиток, а также повышения гигроскопичности и бактерицидности с изнаночной стороны спецодежды в результате наномодифицирования КРНС.

6. Результаты теоретических и экспериментальных исследований воздействием ННТП на толщину до 0,15 нм, где происходит наноструктурирование МТКМС, а также КРНС, где на поверхности волокон концентрируется плотный слой атомов металла (максимально 100 нм), позволяющих повысить физико-механические и защитные свойства от агрессивных сред и бактерий, которые на порядок превосходят контрольные образцы.

7. Результаты экспериментальных исследований и теоретического анализа метода оценки общей пористости многофункциональных текстильных материалов и спилка кожаного материала с использованием объемно-взвешенного метода определения кажущейся и истинной плотности, а также толщины материалов за счет увеличения общей пористости от 41% до 61 % и средней толщины материалов от 15 до 20 % по сравнению с контрольными образцами.

8. Физико-математическая модель увеличения размера внутреннего объема пор волокнистых материалов за счет плазменной обработки микро- и нанопор потоком ННТП пониженного давления и КРНС, что приводит к увеличению поверхности раздела фаз и сорбционной способности МТКМС.

9. Результаты экспериментальных исследований и мониторинг комплексных оценок материалов спецодежды, подтверждающие целесообразность наноструктурирования и наномодифицирования МТКМС, что позволит продлить срок службы спецодежды до двух лет.

10. Результаты экономического обоснования использования разработанных инновационных технологий для изготовления материалов текстильной и легкой промышленности.

**Соответствие диссертации научной специальности.** Тема и содержание диссертационной работы соответствует паспорту научной специальности 2.6.16. Технология производства изделий текстильной и легкой промышленности в части пунктов:

- «Проектирование структуры и прогнозирование показателей свойств и качества волокон, нитей, материалов и ИТЛП» (п. 2);
- «Технологии (в том числе, нанотехнологии) волокон, нитей, материалов и ИТЛП» (п. 3);

- «Развитие теоретических основ проектирования и технологий переработки волокон, производства нитей, материалов и ИТЛП» (п. 10);
- «Разработка новых материалов, обеспечивающих высокие эксплуатационные свойства ИТЛП» (п. 19);
- «Воздействие излучений и плазмы на волокнообразующие полимеры природного и синтетического происхождения, волокна, ткани, кожевенно-меховые и другие ИТЛП» (п. 20).

**Достоверность полученных результатов и выводов** обеспечены использованием современных аттестованных измерительных средств и апробированных методик испытаний согласно ГОСТ; анализом точности измерений; согласованностью теоретических результатов с экспериментальными данными; с применением апробированной математической модели определения проницаемости комплексной пропитки в МТКМС после наноструктурирования потоком ННТП пониженного давления, основанной на фундаментальных законах, а также современных методах решения.

Достоверность результатов подтверждается всесторонним анализом предшествующих научных работ по тематике исследования, взаимной согласованностью результатов, полученных в ходе теоретических и экспериментальных исследований.

**Метрологическое обеспечение исследований** осуществлялось с целью реализации требуемого технического уровня и точности измерений при выполнении исследовательской работы, связанной с проведением измерительного эксперимента входных параметров плазменной установки; оценки корректности выбора системы их измерений и методик выполнения измерений показателей качества МТКМС; обеспечения проведения измерений на поверенном оборудовании; контроля соответствия условий проведения измерений эксплуатационным документам применяемого исследовательского оборудования; осуществления метрологической оценки результатов измерений свойств материалов.

**Апробация работы.** Основные положения работы обсуждались и докладывались на международных научно-технических конференциях: «Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы» (SMARTEX-2016, 2019-2021 (Иваново)); «Новые технологии и материалы легкой промышленности» (Казань, 2016 - 2023); «Модели инновационного развития текстильной и легкой промышленности на базе интеграции университетской науки и индустрии. Образование - Наука- Производство» (Казань, 2016); «Дизайн: новые взгляды и решения» (Казань, 2016); «Техническое регулирование» базовая основа качества материалов, изделий и услуг» (Шахты, 2016); «Российский рынок технического текстиля и нетканых материалов: наука и производство в современных экономических условиях» (Москва, 2017); «Инновационное развитие легкой промышленности» (Казань, 2017, 2018); «Наука — текстильному производству: новейшие отраслевые научные разработки в сфере технического текстиля и практический опыт их применения» (Москва, 2017); «Проблемы дизайн-проектирования и

оформления мусульманской и национальной одежды» (Казань, 2018); Вторые международные Косыгинские чтения «Современные инженерные проблемы ключевых отраслей промышленности» (Москва, 2019); «Инновации-2020» (Москва). Всероссийских научно-технических конференциях: «Наука. Технологии. Инновации» (НТИ-2016, 2017 (Новосибирск); «51-й Федеральной оптовой ярмарки товаров и оборудования текстильной и легкой промышленности» (Москва, 2018); «Физика низкотемпературной плазмы «Фундаментальные и прикладные проблемы создания материалов и аспекты технологий текстильной и легкой промышленности» (Казань, 2019); «Техническое регулирование: базовая основа качества материалов, изделий и услуг» (Шахты, 2019); «Научные исследования и разработки в области дизайна и технологий» (Кострома, 2020), а также в региональных межвузовских научных сессиях КНИТУ (Казань, 2016 -2023). Кроме того, в Международных и всероссийских конкурсах научных работ: «Форум РоснаноТех» (Москва, 2018); «Пятьдесят лучших инновационных идей для Республики Татарстан» (Казань, 2020, 2022). Международных выставках опытных образцов: НИ-ТЕСН «Лучший инновационный проект и лучшая научно-техническая разработка года» (Санкт- Петербург, 2016, 2017), «РосБиоТех- 2016» (Москва, 2016); «Биоиндустрия» (Санкт- Петербург, 2016); «Нефть и газ» (Алма-Ата, Казахстан, 2016), получили призовые места, золотые и серебряные медали.

**Публикации.** Результаты работы отражены в 59 публикациях, в том числе: 22 статьи в журналах, входящих в перечень научных журналов и изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, 3 публикации в научных журналах, индексируемых в международной базе данных Scopus, 6 монографиях, остальные – в материалах конференций различного уровня.

#### **Личный вклад автора.**

Работа является обобщением многолетних исследований автора в области управления показателями качества материалов для одежды специального назначения за счет комплексной технологии плазменного наноструктурирования потоком ННТП пониженного давления с использованием плазменных установок ВЧ-разряда и наномодифицирования КРНС. Научные результаты, включенные в диссертацию и выносимые автором на защиту, получены соискателем лично. Соискатель лично проводил методологические исследования, все вычислительные эксперименты, интерпретацию и анализ полученных результатов, сформулировал выводы. На основе полученных результатов автором данной работы были подготовлены выступления на конференциях, публикации в рейтинговых журналах. Они опубликованы автором лично и в соавторстве с д.т.н., профессором В.В. Хамматовой, д.т.н., профессором Ф.С. Шарифуллиным, которые участвовали в обсуждении полученных результатов, коррекции материалов статей.

Автору присуждена премия Правительства Российской Федерации 2018 года в области науки и техники для молодых ученых за разработку технологий производства многофункциональных композиционных материалов легкой промышленности и их практическую реализацию в отраслях экономики Российской Федерации (г. Москва, Распоряжение №2792-р от 14.12.2018 г.).

## **Структура и объем работы.**

Диссертация состоит из введения, шести глав, общих выводов, списка использованной литературы и трех приложений с копиями документов. Основное содержание работы изложено на 541 страницах машинописного текста и содержит 101 таблиц, 213 рисунка. Список используемой литературы содержит 445 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

*Во введении* обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, изложены основные результаты диссертации, их научная новизна и практическая значимость, представлены основные положения, выносимые на защиту, и структура диссертации.

*В первой главе* обоснован выбор направления исследования, приведен краткий обзор показателей качества МТКМС, рассмотрены их основные свойства. Проведен анализ методов оценки, определяющих уровень качества МТКМС, характеризующиеся показателями надежности, которые в свою очередь, определяются параметрами физико-механических свойств, защитными показателями - огнестойкости и стойкости тканей к агрессивным средам, а также эксплуатационными показателями, включающими краевой угол смачивания, гигроскопичность и водоупорность. Составлена номенклатура исследуемых свойств МТКМС, определяющих показатели качества образцов (рис. 1).

Проанализированы исследования по улучшению потребительских показателей качества материалов по водоупорности, бактерицидности и огнезащитным свойствам, традиционные электрофизические методы модификации, которые позволяют наноструктурировать МТКМС. Обзор литературных источников показал, что из всех электрофизических методов обработки, наибольшее предпочтение отдается потоку ННТП пониженного давления, а в качестве инструмента для управления показателями качества МТКМС применяется плазма высокочастотного (ВЧ) разряда пониженного давления. Проведено обобщение результатов теоретических исследований, что позволило сформулировать основные задачи работы.

Во второй главе приведено описание плазменной установки «ВАТТ 4000 ПТ ПЛАЗМА» для наноструктурирования тканей и прецизионной плазменной установки (ППУ) периодического действия по обработке поверхности спилка, представлены обоснованный выбор и характеристики объектов, и методов исследования их структуры и свойств в результате плазменных воздействий двух установок, а также методики оценки показателей качества МТКМС. Процесс обработки результатов экспериментальных исследований осуществляли методом математической статистики и регрессионного анализа. В качестве объектов исследования выбраны текстильные материалы для спецодежды (ТМС) с содержанием природных, синтетических волокон производства ООО «Башкирский текстильный комбинат» и ООО «Владимирский текстиль», а также спилки кожаного материала для спецодежды

(КМС) сварщиков и металлургов, общие характеристики которых представлены в таблице 1.

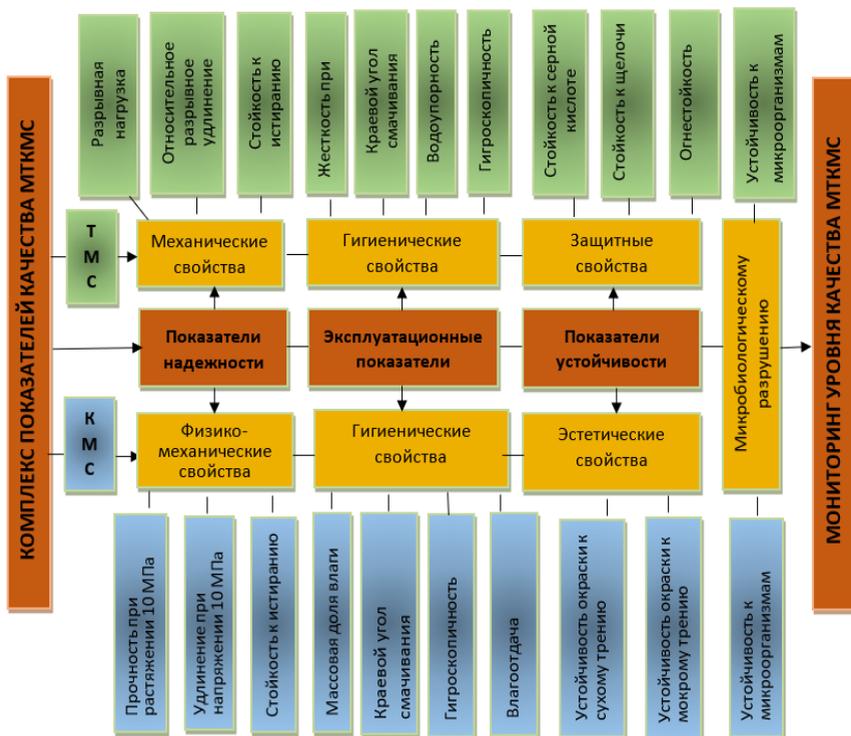


Рисунок 1 – Номенклатура исследуемых свойств МТКМС, определяющих показатели качества образцов

Выбраны параметры наноструктурирования ТМС и КМС, которые получены в результате исследования влияния условий плазмообработки (расхода плазмообразующего газа, мощности разряда, давления в разрядной камере, времени обработки) на показатели качества образцов: надежности, стойкости и эксплуатационные показатели. Плазменное наноструктурирование ТМС проводили при температуре не выше 60°С, частоте генератора ( $f$ )=13,56 МГц, расходе газа ( $G$ ) 0,02–0,08 г/с, мощности разряда ( $W_p$ ) 2,5–4,5 кВт, давлении в разрядной камере ( $P_k$ ) 18 – 29 Па и продолжительности обработки ( $\tau$ ) 0,5–3м/мин. В качестве плазмообразующих газов использовали аргон и воздух. КМС наноструктурировали при ( $G$ ) 0,02–0,08 г/с, ( $W_p$ ) 0,2–2,0 кВт, ( $P_k$ ) 13,3 – 60 Па и ( $\tau$ ) 1–11 мин, в смеси плазмообразующих газов аргон-пропан/бутан. Проведена оценка погрешности результатов экспериментальных показателей качества МТКМС.

Таблица 1 - Общие характеристики МТКМС

Наименование МТКМС	Поверхностная плотность/толщина	Состав волокон, %		Переплетение	Состав пропитки (с лицевой стороны МТКМС)
		шерсть/полиэфир	хлопок/лен		
«Сукно шинельное», серое 2С-4ОП, арт. 6425	760 г/м <sup>2</sup>	87/13	-	полотняное	ООП
«Сукно шинельное», черное 2С-4ВО, арт. 6425	760 г/м <sup>2</sup>	87/13	-	полотняное	МВО
«Парусина полульняная», арт. 11293	450±40 г/м <sup>2</sup>	-	41/59	полотняное	СКПШВО
«Парусина полульняная», арт. 11292	550±40 г/м <sup>2</sup>	-	50/50	полотняное	СКПШВО
«Спилок», арт.301	толщина 1,4-1,8 мм	-		-	Хромовое дублирование

**В третьей главе** представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований изменения структуры и свойств МТКМС под воздействием потока ННТП пониженного давления. Исследуемые материалы разделены на 3 группы. В группу 1 вошли ткани («Сукно шинельное», серое 2С-4ОП), «Сукно шинельное», черное 2С-4ВО», содержащие 87% шерстяных, 13% полиэфирных волокон, поверхностной плотностью 760 г/м<sup>2</sup>; во 2 группу образцы двух артикулов тканей («Парусина полульняная»), которые отличались составом и поверхностной плотностью, содержащие соответственно 41% хлопка и 59% льна, поверхностной плотностью 450±40 г/м<sup>2</sup> (арт.11293) и 50% хлопка и 50% льна, поверхностной плотностью 550±40 г/м<sup>2</sup> (арт.11292); в группе 3 представлен образец КМС («Спилок») из КРС, поверхностной плотностью 1,4-1,8 мм. Выбранные МТКМС наиболее часто используются спросом у рабочих сварщиков промышленных предприятий, содержат улучшенные ООП, МВО, СКПШВО пропитки.

Для повышения показателей качества ТМС и КМС, в работе предложено в технологические процессы плазменной обработки потоком ННТП пониженного давления и отделки образцов включить операцию наноструктурирования ТМС и соответственно наноструктурирования КМС.

При исследовании ткацкой структуры ТМС особый интерес представляла «Парусина полульняная» полотняного переплетения, в которой на лицевой и изнаночной сторонах ткани располагались смешанные волокна хлопка и льна, что обеспечивало комплексный эффект плазменного наноструктурирования. В результате плазменного воздействия на образцах тканей увеличилась относительная разрывная нагрузка по основе на 37 % и по утку на 31 %. Кроме того, улучшились показатели надежности и эксплуатационные показатели ТМС:

относительное разрывное удлинение по основе на 20 % и по утку на 13%; стойкость к истиранию в 2,5 раза, водоупорность на 66 %; гигроскопичность на 7,5%, при этом стойкость ТМС к кислоте и щелочи увеличилась по основе на 27% и по утку на 33%, огнестойкость составила 420с.

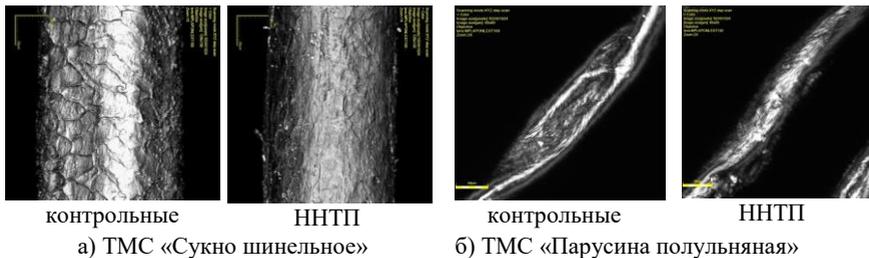
Показатели качества определяли на ТМС «Сукно шинельное» с водоотталкивающей обработкой 2С-4ВО для контрольного и наноструктурированного образцов по выбранному режиму ННТП:  $P_k = 25-27$  Па;  $W_p = 4,0$  кВт;  $\tau = 1$  м/мин;  $G_{\text{возд}} = 0,04$  г/с. В результате плазменного воздействия на образцы тканей относительная разрывная нагрузка увеличилась по основе на 35 % и по утку на 33 %, стойкость к истиранию до 16% и водоупорность до 41%. Установлено, что полученные показатели надежности, эксплуатационные и защитные показатели тканей не зависят от состава применяемых плазмообразующих газов (аргон, воздух). Поэтому для уменьшения затрат в технологических процессах наноструктурирования ТМС выбран плазмообразующий газ воздух.

Предложен технологический процесс производства КМС с улучшенными показателями качества. Технологический процесс производства экспериментальных образцов КМС отличался от обычного за счет очистки поверхности и закрепления микроструктуры с помощью потока ННТП пониженного давления в плазмообразующей газовой смеси аргон: пропан/бутан (70:30) в определенных режимах обработки.

Повысился предел прочности при напряжении 10 МПа на 32%, кроме того, удлинение на 35% и стойкость к истиранию на 26% при  $W_p = 1,55 - 1,70$  кВт,  $\tau = 7$  мин,  $P_k=26,6$ Па. Вакуумная сушка позволила целенаправленно улучшить гидрофобность наноструктурированной спилка кожевенного материала на 15%.

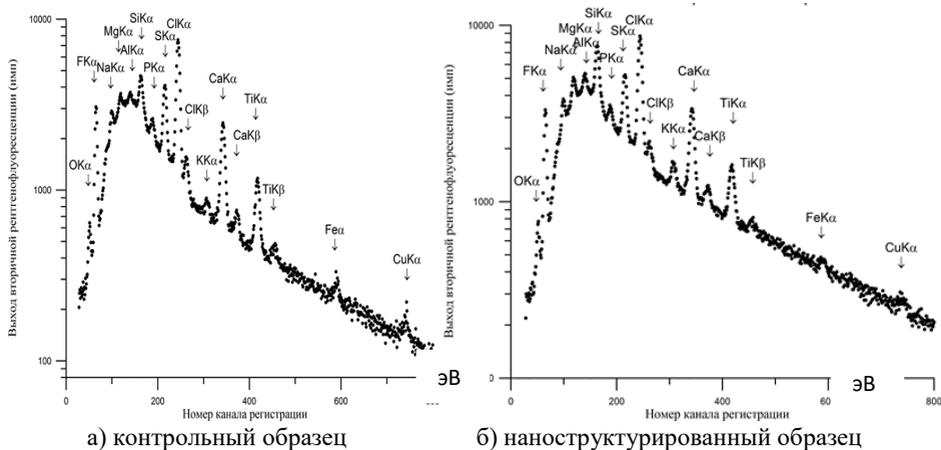
Гигроскопичность и влагоотдача повысились на 30 - 31%, а также устойчивость окраски к сухому и мокрому трению увеличилась до 5 баллов, огнестойкость до 94,6%. Остаточный предел прочности при растяжении 10 МПа уменьшился на 5,4%, что обеспечит комфортное ношение рабочей спецодежды в течение длительного времени.

По данным лазерного сканирующего 3D микроскопа LEXT4000 при увеличении в 512 раз (рис.2), установлена зависимость эффекта плазменного воздействия на ткани полотняного переплетения зависит от вида волокон и изменения состояния их удельной поверхности с лицевой стороны. После воздействия ННТП пониженного давления происходит выравнивание поверхностного слоя волокон на толщину 0,15 нм. Сравнение спектров рентгеновской флуоресценции (РФА) экспериментальных образцов ТМС «Парусина полульняная» показал, что в результате ННТП поверхностного слоя образца толщиной 15 нм произошли изменения. На спектрах образцов ТМС до и после плазменного воздействия присутствовали рентгенофлуоресцентные линии  $OK\alpha$ ,  $FK\alpha$ ,  $NaK\alpha$ ,  $MgK\alpha$ ,  $AlK\alpha$ ,  $SiK\alpha$ ,  $PK\alpha$ ,  $SK\alpha$ ,  $ClK\alpha$ ,  $KK\alpha$ ,  $CaK\alpha$ ,  $TiK\alpha$ ,  $FeK\alpha$  и  $S\alpha$  и отсутствовали линии аргона (поскольку измерения проводились в вакууме).



а) ТМС «Сукно шинельное»      б) ТМС «Парусина полульняная»  
*Рис.2- Микрофотографии поверхности ТМС×512*  
 а) сукно ННТП: ( $Wp= 4,0$  кВт,  $G_{возд}=0,04$  г/с,  $P=25-27$  Па,  $\tau=1$ м/мин);  
 б) парусина ННТП: ( $Wp= 3,5$  кВт,  $G_{возд}=0,04$  г/с,  $P=20-22$  Па,  $\tau=1$ м/мин).

На рисунке 3 представлены исследования ионно-пучкового метода анализа, что позволило определить изменения в содержании элементов в поверхностном слое МТКМС.



а) контрольный образец      б) наноструктурированный образец  
*Рисунок 3 – Спектр рентгеновской флуоресценции поверхности образца ТМС «Парусина полульняная» (50% хлопка и 50% льна)*  
 ( $Wp= 3,5$  кВт,  $G_{возд}=0,04$  г/с,  $P=20-22$  Па,  $\tau=1$ м/мин)

Для наноструктурированных образцов наблюдалось повышение интенсивности фоновой составляющей, что свидетельствовало об увеличении плотности поверхностного слоя волокна в 10 раз. Основными примесными элементами в текстиле «Парусина полульняная» являются атомы Fe и Ti, а также фтор. Следует отметить, что содержание фтора в волокнах оценивается на уровне  $(1\div 2)\%$ , других элементов (за исключением Fe и Ti) оценивается на уровне  $(1\div 3)\times 10^{-7}\%$ . Поэтому эти элементы не проявляются в условиях возбуждения рентгеновской флуоресценции. В спектре РФА ПВО видно наличие линии кислорода  $OK\alpha$ . Кроме этой линии, в спектре также присутствовали железо  $FeL\alpha$ , натрий  $NaK\alpha$ , цинк  $ZnL\alpha$ ,

фосфор РК $\alpha$ , сера SK $\alpha$ , хлор СК $\alpha$ , калий КК $\alpha$ , кальций СаК $\alpha$ , скандий ScК $\alpha$ , титан TiК $\alpha$ , ванадий VK $\alpha$ , при этом доминировали в спектре отчетливые линии хрома CrК $\alpha$ . Данные исследования позволили предположить, что происходит уплотнение волокна на глубину порядка 100 нм и происходит очистка плазмой поверхностного слоя волокон толщиной 0,15 нм, соответственно, а также формирование на поверхности волокон более плотного слоя из примесных атомов металлов Ca, Ti, Fe, Zn толщиной около 15 нм, что способствует повышению физико-механических свойств МТКМС и предотвращению преждевременного износа спецодежды.

В работе методом рентгеноструктурного анализа оценены изменения в надмолекулярной структуре волокнообразующих полимеров МТКМС и их структурные особенности, обусловленные воздействием ННТП. По сравнению с дифрактограммой контрольных образцов при ННТП пониженного давления прослеживается возрастание интенсивности размеров кристаллических областей и уменьшение размеров аморфных участков как в тканях, так и спилке, что свидетельствует о значительном упорядочении структуры полимеров за счет образования новых центров кристаллизации.

Таким образом, увеличение содержания кристаллической фазы способствует повышению показателей надежности ТМС (разрывная нагрузка, относительное разрывное удлинение и т.д.), а в КМС (предел прочности и удлинение при растяжении). Кроме того, наблюдается упорядочивание аморфной фазы и образование сшивок и прочных связей между макромолекулами волокнообразующих полимером, что способствует повышению эксплуатационных и защитных свойств. Также методом ИК-спектроскопии выявлено, что после плазменной обработки образуется дополнительное количество водородных взаимодействий, что вносит свой вклад в увеличение физико-механических показателей.

**В четвертой главе** приводятся результаты исследований МТКМС после применения технологического процесса наномодифицирования КРНС, включающей наноструктурирование в потоке ННТП пониженного давления с последующей обработкой растворами коллоидных наночастиц серебра для улучшения показателей качества спецодежды. Наномодифицирование экспериментальных образцов МТКМС проводили с целью придания им антибактерицидных свойств, путем применения композиционной пропитки с добавлением КРНС в ООП, МВО, СКППВО пропитки. Средний размер наночастиц серебра составил 16 нм. В качестве основных исследуемых показателей качества наномодифицированных МТКМС выбраны показатели надежности, характеризующие механические свойства, а также эксплуатационные показатели и огнестойкости за счет наличия в растворе КРНС частиц металла, которые оказались выше 10%, относительно наноструктурированных образцов.

Биостойкость ТМС «Парусина полульняная» оценивалась после воздействия микроорганизмов по остаточной  $R_n$ . Результаты изменения  $R_n$  в наномодифицированных ТМС представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Изменение коэффициента биостойкости наноструктурированных и наномодифицированных образцов ТМС

Виды ТМС	Вид микрофлоры	Коэффициент биостойкости по разрывной нагрузке			Средняя скорость снижения разрывной нагрузки в сутки, %
		Время воздействия микрофлоры			
		5 сут.	10 сут.	15 сут.	
Контрольный	<i>Bacillus subtilis</i>	75,5	73,5	50,6	2,48
	<i>Escherichia coli O55</i>	78,1	71,6	52,7	2,54
Наноструктурированный ННТП	<i>Bacillus subtilis</i>	90,7	87,8	81,6	0,91
	<i>Escherichia coli O55</i>	94,6	91,6	84,2	1,04
Наномодифицированный ННТП+КРНС	<i>Bacillus subtilis</i>	96,7	94,1	91,6	0,51
	<i>Escherichia coli O55</i>	96,4	92,6	90,2	0,62

Как видно из полученных данных (табл. 2) коэффициент биостойкости всех исследованных материалов снижается с увеличением времени воздействия микроорганизмов, при этом следует отметить, что действие бактерий *Escherichia coli O55* оказалось более сильным по сравнению с действием спонтанной микрофлоры и бактерий *Bacillus subtilis*. Средняя скорость снижения разрушающего напряжения этих образцов под действием микрофлоры *Bacillus subtilis* в контрольных образцах составляет 2,04% в сутки, в наноструктурированных ННТП образцах – 0,80% и в наномодифицированных ННТП +комплексная пропитка – 0,41% в сутки. Под действием бактерий *Escherichia coli O55* в контрольных образцах средняя скорость снижения разрушающего напряжения – 2,22% в сутки, соответственно в наноструктурированных КМС скорость ниже в 2,3 раза и наномодифицированных образцах в 3,8 раз, относительно контрольных образцов. В контрольных образцах, где основным процессом при нанесении композиционной пропитки на ТМС является адсорбция, не позволяющая наночастицам серебра достаточно прочно закрепиться на поверхности материалов и равномерно диспергироваться в структуре ТМС, что увеличивает их скорость снижения разрушающего напряжения.

Методом ИК–спектроскопии исследовали волоконобразующие полимеры до и после плазменной обработки и наномодифицирования КРНС. Установлено, что существенных отличий в положении пиков ИК–спектров хлопка и льна не обнаружено, что свидетельствует об отсутствии химических превращений в волоконобразующих полимерах. Однако, после ННТП появляется широкая полоса в области  $3600-3000\text{ см}^{-1}$ , которая указывает на валентные колебания водородных связей между гидроксильными группами макромолекул, простой эфирной связью и атомами водорода полимерной цепи, в результате чего формируются довольно сложные надмолекулярные структуры, состоящие из молекул ПАВ, контактирующих с МВО и СКППВО пропитка-

ми, что вносит свой вклад в увеличение водоупорности и огнестойкости исследуемых образцов. После обработки аргоном при наномодифицировании композиционными пропитками на основе КРНС обнаруживаются пики, относящиеся к агрегатам частиц серебра, при  $500-600\text{ см}^{-1}$  и  $1028-1100\text{ см}^{-1}$ , что свидетельствует о том, что частицы серебра закрепились на волокнах. Кроме того, в условиях наноструктурирования ННТП пониженного давления происходит частичное окисление углеводородных фрагментов целлюлозы за счет кислорода воздуха, что повышает взаимодействие волокнообразующего полимера с пропитывающими составами с лицевой стороны материала и гидрофильность с изнаночной стороны, тем самым улучшая гигроскопичность и создавая «дышащий» эффект МТКМС. После наномодифицирования шерстяного волокна КРНС наблюдается незначительное увеличение количества групп С=О и очистка поверхности. Анализ ИК-спектров наноструктурированных КМС из спилка показывает, что полоса при  $829\text{ см}^{-1}$  принадлежит валентному колебанию С-С;  $998\text{ см}^{-1}-1057\text{ см}^{-1}$ , присутствует смешанное колебание С-С и СН групп; валентное колебание С-О с широким пиком при  $1155\text{ см}^{-1}-1022\text{ см}^{-1}$  обычно принадлежат первичным гидроксильным группам, которые облегчают равномерное распределение КРНС в объеме дермы путем уменьшения разности потенциалов между волокнами и частицами серебра, снижения размера частиц, повышения их стабильности за счет дополнительного наноструктурирования поверхности спилка.

**В пятой главе описана** вероятностная модель пористой структуры поверхности раздела фаз твердое тело–жидкость. Все показатели свойств зависят от состояния поверхности ТМС и КМС составляющих основу материалов спецодежды. Для этого провели оценку их пористости. Для исследования взаимодействия потока низкоэнергетичных ионов с поверхностью МТКМС провели количественные оценки с помощью математической модели на основе метода Монте-Карло. Вероятностную модель пористой структуры образцов МТКМС, наполненных композиционной пропиткой (ООП, МВО, СКПВО, КРНС) строили следующим образом. Слои в элементарной ячейке нумеровали от поверхности вглубь образца волокон. С помощью нескольких генераторов равномерно распределенных случайных чисел для слоя с номером  $k$  определяли диаметры макро-, микро- и нанопор  $d_k$ . Так, суммарный объем пор образцов наноструктурированных волокнистых материалов составлял от  $0,0198$  до  $0,0264\text{ м}^3/\text{г}$ , в зависимости от типа МТКМС, с минимальным размером пор от  $4,03$  до  $6,87\text{ нм}$  и максимальным размером пор до  $169,7\text{ нм}$ . Затем определяли пористость слоя как отношение общей площади сгенерированных пор к площади сечения элементарной ячейки. Для элементарной ячейки полимера поперечное сечение выбирали таким образом, чтобы вдоль одной из сторон располагалось 5-10 микропор. Размеры элементарной ячейки рассматриваемого образца составили  $10 \times 10 \times 100\text{ мкм}^3$ . Высоту ячейки подбирали так, чтобы все ионы с вероятностью 100% попали на поверхность образца. В случае получения общей пористости образца меньше заданного диаметра пор продолжали генерировать до тех пор, пока общая пористость слоя не достигла заданного значения. В результате первого этапа получили

модельное распределение пор в элементарной ячейке в виде случайного набора диаметров  $(d_i^k, \dots, d_{N_k}^{(k)})$ .

Для каждого слоя генерировали также равномерное распределение по объему слоя гидрофобных пропиток, при этом диаметры наночастиц определяли также случайным образом согласно нормальному закону распределения, после чего вычисляли суммарный объем и массу наполнителя в слое.

Таким образом, вероятностная модель пористой структуры МТКМС вместе с наполненной пропиткой представляет собой последовательность векторов:

$$(N_k; d_i^k, \dots, d_{N_k}^{(k)}; V_k), \quad (1)$$

где  $N_k$  – число микропор в  $k$ -м слое;  $d_i^{(k)}$ ,  $i=1; N_k$  – диаметр  $i$ -й микропоры в  $k$ -м слое;  $V_k$  – суммарный объем частиц наполнителя в слое.

Затем имитировали проникновение атомов плазмообразующего газа в поры. Моделировался равномерно поступающий поток ионов, последовательно проходящий сквозь все слои элементарной ячейки. Для слоя  $k$  определяли вероятность  $p$  попадания заряженной частицы на поверхность микропоры как отношение площади сечения пор в слое к площади поперечного сечения элементарной ячейки:

$$S_k = \pi d \times \sum_{i=1}^{N_k} [d_i^{(k)}]^2. \quad (2)$$

С целью достижения статистической достоверности результатов проводили тысячу численных экспериментов и подсчитывали количество атомов, попавших на поверхность микропоры в каждом слое. Согласно полученным данным, максимальная глубина проникновения атомов плазмообразующего газа в поверхностный слой образца составляет 15 мкм, при этом около 95 % их задерживается в слое толщиной 2 мкм. Однако, вследствие большой площади на межфазной границе между атомами плазмообразующего газа и полимером, проницаемость композиционных пропиток после обработки в потоке ННТП уменьшается, в аргоне практически в 1,5 – 2 раза. С целью подтверждения результатов математического моделирования проведены исследования краевого угла смачивания МТКМС до и после плазменной обработки в режиме:  $W_p= 3,5$  кВт,  $G= 0,04$  г/с,  $P_k= 20-21$  Па,  $\tau= 1$ м/мин,  $f=13,56$  МГц, в плазмообразующих газах аргон и воздух. Наилучшие результаты наблюдались при обработке в плазмообразующем газе аргон: водоупорность материала «Полульняная парусина» (50% лен, 50 % хлопок), в этом случае повышалась на 67% за счет увеличения количества замкнутых пор, которые практически не поглощали воду, что согласуется с результатами математического моделирования.

Исследовали образцы для определения кажущейся плотности, истинной плотности, а также пористости и удельной поверхности образцов с использованием газового сорбционного анализатора. Совокупность полученных результатов пористости контрольных и наноструктурированных образцов МТКМС приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Определение расчетных параметров пористости образцов МТКМС

Условное обозначение	МТКМС	Плотность, г/см <sup>3</sup>		Общая пористость, $P_0$ , %	Суммарный внутренний объем пор, $V_{П}$ , см <sup>3</sup> /г	Пористость по азоту, $P_N$ , %
		кажущаяся, $\rho_v$	истинная, $\rho_t$			
контр	«Сукно шинельное» 2С-40П	0,427	1,532	37,4	0,0167	2,56
ННТП		0,409	1,322	44,7	0,0221	2,92
контр	«Сукно шинельное» 2С-4ВО	0,450	1,539	35,7	0,0173	2,66
ННТП		0,432	1,378	41,2	0,0216	2,84
контр	«Полульняная парусина» 11292	0,479	1,313	38,9	0,0220	2,89
ННТП		0,467	1,283	40,7	0,0264	3,30
контр	«Полульняная парусина» 11293	0,507	1,362	36,1	0,0181	2,40
ННТП		0,486	1,322	38,8	0,0198	2,62
контр	«Спиллок»	0,766	1,533	15,2	0,0201	3,08
ННТП		0,627	1,371	27,2	0,0226	3,50

Как видно из таблицы 3, относительная доля пористости по азоту невелика и составляет от 2,4 до 3,5 %. В случае ННТП ТМС «Сукно шинельное» (состав: 87% шерсти, 13% п/э) общая пористость  $\Delta P_0$  увеличилась до 45%, хотя увеличение пористости по азоту не превысило 14%. Увеличение пористости по азоту наблюдалось в наноструктурированном ТМС «Парусина полульняная», содержащем 41% хлопка и 59% льна. Преимущественное воздействие активных частиц потока ННТП на межклеточные вытесненные целлюлозные волокна композитных связующих из хлопка и льняного волокна привело к увеличению общей пористости и  $\Delta P_0$  до 41%, что, по-видимому, связано с преимущественным воздействием активных частиц потока ННТП пониженного давления на примеси целлюлозы, дислоцированных в межклеточных образованиях связующих веществ комплексного хлопкового волокна.

Результаты исследований пористости наноструктурированных волокон подтверждают интенсифицирующее влияние потока ННТП пониженного давления на повышение пористости материалов, а также мезопоровых и субмикроскопических пространств в тонкой структуре волокнообразующих полимеров, по видимому за счет воздействия теплового потока, бомбардировки поверхности наноструктурированных материалов активными ионами, нейтральными атомами, а также возбужденными частицами плазмообразующих потоков газа, что приводит достаточному удалению низкомолекулярных веществ и связанной воды.

Типичный размер наночастиц серебра составляет 5-50 нм. Как показали исследования, важно использовать наносеребро с размером частиц не более

9-10 нм. Это связано с тем, что более мелкие частицы серебра эффективнее проникают через клеточные мембраны микроорганизмов и более равномерно распределяются. В результате бактерицидный эффект достигает максимального уровня после обработки МТКМС наночастицами серебра меньшего размера. При этом концентрация металла в КРНС составляет ~10 мг/мл. Результаты моделирования для получения МТКМС, обладающих как гидрофобными, так и антимикробными свойствами.

Принцип комбинированной пропитки ООП, МВО и КРНС заключался в нанесении на поверхность МТКМС полимерной пленки, которая удерживалась за счет адгезии, тем самым придавала материалам гидрофильный комплекс и что также способствовало улучшению гидрофобных (барьерных) свойств ТМС и КМС, используя уравнение (3), когда ионы серебра и жидкости проникают в переходный слой и полимер:

$$\frac{P_{нп}}{P_n} = \frac{P_M}{P_{п\varphi^n} + P_M(1 - \varphi^n)} \frac{V_{жм}}{l_M} + \frac{V_{жп} + V_{п}}{l}, \quad (3)$$

где  $P_{нп}$ ,  $P_{п}$  – проницаемость наполненного и ненаполненного полимеров;  $V_{п}$  и  $\varphi$  – объемные доли пленкообразующего материала и наполнителя;  $V_{жм}$  и  $V_{жп}$  – объемные доли жидкости в межфазной зоне и полимерной матрице соответственно;  $l$  и  $l_M$  – факторы кривизны для полимерной матрицы и переходного слоя.

Поэтому в зависимости от того, какие факторы преобладали в стимулировании или ингибировании процесса проникновения вещества, определялось положительное и отрицательное влияние межфазного взаимодействия на гидрофобные и антимикробные свойства МТКМС наполненных покрытий, содержащих фторуглеродные группы и ионы серебра.

Микроскопические исследования подтверждали, что поры и низкоэнергетические пропитки комплексного состава (ООП, МВО, КРНС) наноструктурированных МТКМС расположены случайным образом. При моделировании рассматривалась система параллельных плоских слоев толщиной  $d$ , где  $d = 2$  мкм – максимальная оценка диаметра микропоры. Длина каждого фрагмента микропор не превышала диагонали поперечного сечения элементарной ячейки, и предполагалось, что в слое не более 10 микропор.

Таким образом, результаты математического моделирования показывают, что использование наномодифицированных МТКМС, предварительно обработанных потоком ННТП пониженного давления и пропитанных (композиционной пропиткой КРНС и фторсодержащими составами), заполнение пористой структуры МТКМС композиционной пропиткой, снижает влияние агрессивных сред (кислот, щелочей), проницаемость уменьшаются, бактерицидные свойства сохраняются в 1,5-2 раза, повышается уровень качества образцов.

**В шестой главе** приводятся результаты исследований показателей качества спецодежды сварщиков из МТКМС до и после опытных носок и стирок спецодежды в производственных условиях. Проводили оценку уровня качества повседневной рабочей одежды.

На рисунке 4 представлен мониторинг надежности материалов для спецодежды после опытных носок в течение 24 месяцев.

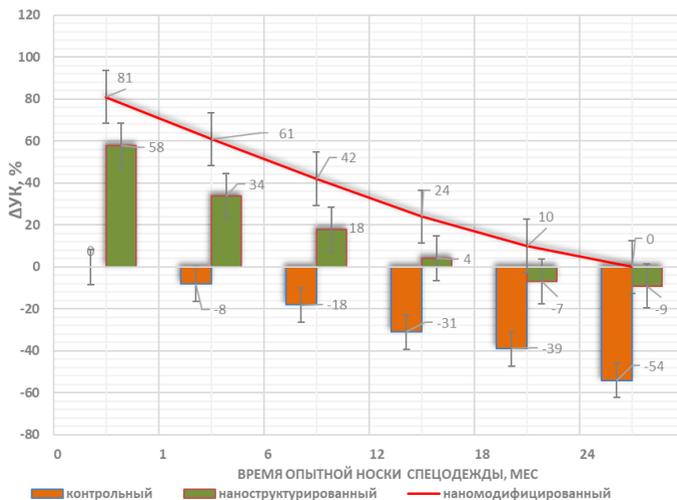


Рисунок 4 – Гистограмма итогового уровня качества ТМС и спилок КМС по средним показателям надежности спецодежды

Проведенный сравнительный анализ показателей качества исследуемых образцов МТКМС позволил установить, что по надежности наноструктурированные образцы показали уровень качества выше 1 в первый месяц экспериментальной носки на 58 % и на 81 % выше для наномодифицированных образцов. Как видно из гистограммы итоговых уровней после экспериментальной носки и химчистки образцов наноструктурированного ТМС, уровень качества оставался выше 1 в течение 12 месяцев, а также для образцов наномодифицированного ТМС до 24 месяцев. В контрольном образце уровень качества был ниже 1 с первого месяца эксперимента, а затем монотонно снижался в течение 24 месяцев до 54 %. На основе проведенных исследований эксплуатационных показателей установлено, что после опытных носок спецодежды, водоупорность и гигроскопичность для экспериментальных образцов материалов ННТП и КРНС сохраняется в заданном диапазоне в течение 24 месяцев.

Проведены исследования ННТП и КРНС на показатели огнестойкости и стойкости материалов к действию агрессивных сред (щелочи и кислоты). В качестве критерия оценки показателя качества МТКМС выбрана остаточная разрывная нагрузка. В результате исследований установлено, что стойкость наноструктурированных и наномодифицированных материалов к агрессивным средам сохраняется на протяжении 24 месяцев, а в контрольных образцах – 6 месяцев, после 12 месяцев опытных носок и стирок МТКМС становятся ограниченно стойкими ( $\Delta C_i \geq 75\%$ ).

Выявлено, что регулирование параметров потока ННТП пониженного давления и воздействие водоотталкивающих, огнестойких и КРНС пропиток позволяет управлять показателями качества МТКМС. Для них предложены модели спецодежды из МТКМС, технические требования и рекомендация к опытным образцам, а также приведены их технические характеристики и технико-экономическое обоснование эффективности, и расширение сфер конкурентоспособного практического их использования. Суммарный экономический эффект от внедрения технологии получения наноструктурирован-

ных и наномодифицированных МТКМС составит в первый год внедрения 22,645 млн рублей для 8586 пог. метров материала ТМС и 3570 м<sup>2</sup> материала КМС и во второй год 36,529 млн рублей для 9452 пог. метров материала ТМС и 3884 м<sup>2</sup> материала КМС за счет повышения уровня качества материалов спецодежды. Срок окупаемости производства и реализации многофункциональной спецодежды составляет три года.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате комплекса проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработаны научно-технологические основы управления показателями качества объектов исследования, повышающие физико-механические и защитные свойства МТКМС за счет комбинированной технологии наноструктурирования потоком ННТП пониженного давления и наномодифицирования КРНС, путем воздействия пропитки комплексным составом (МВО+ООП+КРНС) на капиллярно-пористую структуру материалов, которые заключаются в следующем:

- в процессе ионной бомбардировки поверхности тканей и кожи в потоке ННТП пониженного давления и «быстрого» проникновения атомов плазмообразующего газа на их внутренние поверхности, происходит рекомбинации заряженных частиц и перераспределение размеров пор МТКМС;

- максимальное воздействие ионная бомбардировка оказывает на глубине от 0,03 до 0,045 нм, после которого интенсивность ионного воздействия снижается;

- совместное влияние кинетической и потенциальной энергии ионов плазмообразующего газа приводит к возможности управления микроструктурой МТКМС;

- в результате плазменной обработки изменяются физико-механические показатели образцов, за счет потока ННТП пониженного давления, который воздействует не только на поверхность материала, но также и на нити и волокна, расположенные в глубине, что объясняется эффектом объемной обработки пористых материалов

- в ходе процессов подготовки к пропитке ТМС и КМС активные реагенты диффундируют в пористую структуру волокон и кожи, а затем происходит проникновение комплексным составом пропитки (МВО+ООП+КРНС).

2. Установлено, что направленное управление свойствами МТКМС за счет технологических режимов воздействия потоком ННТП пониженного давления, позволяет повысить показатели надежности образцов спецодежды в результате увеличения разрывной нагрузки ТМС из полульняной парусины и сукна шинельного до 39% по основе и до 35% по утку; соответственно относительного разрывного удлинения до 45%, что связано с уменьшением остаточного напряжения, процессов релаксации, увеличением упругости и эластичности волокон, а также сил сцепления нитей по сравнению с контрольными образцами. При этом конформационные изменения в микро-

структуре волокон позволили повысить стойкость к истиранию полульняных тканей в 3-4 раза, а сукна шинельного на 16%; снизить жесткость при изгибе ТМС соответственно на 40% и 18%, а в КМС повысить предела прочности при напряжении 10 МПа на 13,5 % и удлинения до 35 %, а также износостойкость на 26,2%, по сравнению с контрольными образцами.

3. Теоретически обоснованы результаты исследований увеличения размера внутреннего объема пор волокнистых материалов за счет обработки микро- и нанопор потоком ННТП пониженного давления и КРНС, что позволило разработать физическую и математическую модели наноструктурирования и наномодифицирования пористой структуры материалов. Результаты расчетов, выполненные с использованием математической модели, и согласующиеся с ними данные экспериментальных исследований позволяют утверждать, что максимальная глубина проникновения атомов плазмообразующего газа в поверхностный слой гидрофобной и бактерицидной пленки, состоящей из комплексной пропитки МВО и КРНС составляет до 18 мкм, при этом около 95% атомов плазменного газа задерживается в слое толщиной 10 мкм при определенных технологических условиях обработки потоком ННТП пониженного давления.

4. Впервые предложены методы оценки общей пористости ТМС и КМС с использованием объемно-взвешенного метода определения кажущейся и истинной плотности, а также толщины материалов. Использование метода показало увеличение общей пористости от 41% до 61 % и средней толщины материалов от 15 до 20 % по сравнению с контрольными образцами. Установлено, что после ННТП обработки гигроскопичность ТМС повысилась до 9,7%, а гигроскопичность и влагоотдача КМС соответственно на 30,2% и 30,5%, за счет увеличения общего объема пор до 1,4 раза, удельной поверхности пор в 1,5 раза и более эффективной сорбции пропитывающего агента по глубине материала.

5. Предложено новое техническое решение увеличения гидрофобных и защитных свойств МТКМС за счет пропитки комплексным составом (МВО+ООП+КРНС) наноструктурированных ТМС и КМС, что способствует увеличению водоупорности парусины и сукна соответственно на 66% и 41%, стойкости к кислоте, по основе на 39% и 45% и по утку на 34% и 39%; стойкости к щелочи парусины полульняной на 39%, а в спилке краевого угла смачивания на 15 %, относительно контрольных образцов. Комплексная пропитка на основе КРНС привела к дополнительному повышению показателей качества МТКМС на 10-12%, относительно наноструктурированных образцов, так как на поверхности волокон образуется плотный слой (>0,15 нм), содержащий на порядок большую концентрацию атомов металла толщиной до 100 нм.

6. Установлено, что плазменное наноструктурирование образцов КМС, привело к повышению устойчивости окраски как к сухому, так и мокрому трению во время опытных носок и химчисток спецодежды в течении 24 месяцев, что соответственно составило 5 и 4 баллов; огнестойкость спилка не изменилась, так как остаточный предел прочности КМС при напряжении 10

МПа уменьшился на 5,4% за счет механических нагрузок, оказываемых на материал спецодежды. Устойчивость ТМС к воздействию агрессивных сред (кислот и щелочей) снизилась на 13% после 18 месяцев эксплуатации спецодежды и на 32% после 24 месяцев эксплуатации спецодежды, но превышает критически минимальные значения показателя стойкости материалов.

7. Разработаны конкурентоспособные опытные образцы спецодежды из наноструктурированных и наномодифицированных МТКМС с учетом требований ГОСТ и пожеланий заказчиков, при этом на промышленных предприятиях реализованы опытно-промышленные испытания на износ, которые показали, что обработка материалов потоком ННТП пониженного давления и КРНС повышает качество и защитные свойства позволяет защитить работников от химических веществ, тепловых потоков и горячих брызг расплава металла при сварке, резке и механической очистке металлических поверхностей. Экспериментально доказано, что итоговый уровень качества образцов спецодежды сварщика из наноструктурированных и наномодифицированных МТКМС после опытных носок в условиях промышленных производств сохраняется до 18 месяцев, далее снижается до 0,9. Установлено, что срок службы спецодежды максимально повышается в 2 раза в наномодифицированных МТКМС, а в наноструктурированных продлевается в 1,5 раза, относительно контрольных образцов.

8. Результаты исследований, приведенные в диссертации, могут быть применены на металлургических, нефтехимических, строительных и оборонных промышленных предприятиях при создании комбинированной спецодежды на основе применения натуральных МТКМС «Полульняная парусина», «Сукно шинельное» и «Спилок» кожевенного материала. Экономический эффект от внедрения наноструктурированных и наномодифицированных материалов для рабочей спецодежды в первые два года составляет 22,6 млн. рублей (18038 пог. метров ТМС и 7454 м<sup>2</sup> КМС) за счет повышения уровня качества образцов спецодежды. Срок окупаемости производства и реализации многофункциональной спецодежды составляет три года. Разработанные МТКМС прошли опытно-промышленные испытания на АО «КазХимНИИ» (г. Казань) и внедрены на предприятия: ЗАО «Серпуховский кожевенный завод «Труд» (г. Серпухов); ООО «Рыбинский кожевенный завод» (г.Рыбинск); ООО «СОФТСТИЧ-М» (г. Москва); ООО «Эс-Дизайн» (г.Москва); научно-производственное объединение «Программируемые композиции» (г. Кострома); и ООО «Доротех» (г. Казань).

9. Проведенные исследования показали, что увеличение срока службы специальной одежды происходит за счет совокупного повышения показателей надежности, работоспособности и защитных свойств, в результате совершенствования технологии МТКМС, контроля оптимальных параметров плазменного воздействия, повышения качественных показателей ТМС и КМС, а также новых технических решений, которые одновременно повышают как гидрофобность, так и огнестойкость материалов рабочей одежды, а

также гигроскопичность и бактерицидные свойства благодаря воздействию пропитки комплексным составом (МВО+ООП+КРНС).

Перспективы дальнейшей разработки темы настоящей работы заключаются в развитии научных основ взаимодействия потока ННТП пониженного давления со структурой технических материалов из химических волокон и нитей в более широком аспекте с целью улучшения совокупных показателей качества по надежности, работоспособности и защитным свойствам.

**Основные публикации, отражающие содержание диссертации  
Статьи, опубликованные в научных рецензируемых изданиях,  
рекомендованных ВАК РФ:**

1. **Гайнутдинов, Р.Ф.** Наноструктурирование красителей для меховой овчины для производства утепленной спецодежды / Р.Ф. Гайнутдинов //Вестник Казанского технологического университета. – 2014. –Т.14. – № 19. – С. 73–74.
2. **Гайнутдинов, Р.Ф.** Методы получения экспериментальных образцов наномодифицированных материалов меховой овчины, обработанных в коллоидном растворе наночастиц серебра / Р.Ф. Гайнутдинов, И.Ш. Абдуллин, Ф.С. Шарифуллин, А.П. Кирпичников //Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т.14. – № 20. – С. 65–67.
3. **Гайнутдинов, Р.Ф.** Изготовление и проведение испытаний опытных образцов одежды специального назначения из наноструктурированных материалов /Р.Ф. Гайнутдинов, К.Э. Разумеев, В.В. Хамматова //Швейная промышленность. – 2015. – № 3. – С. 34–36.
4. **Гайнутдинов, Р.Ф.** Электрофизические методы наноструктурирования текстильных материалов, применяемых для производства специальной одежды / Р.Ф. Гайнутдинов, В.В. Хамматова // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2015. – № 3 (357). – С. 34–39.
5. Хамматова, Э.А. Исследовательские испытания механических свойств наномодифицированных текстильных материалов, применяемых для специальной защитной одежды / Э.А. Хамматова, **Р.Ф. Гайнутдинов** // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2016. – № 6 (366). – С. 26–31.
6. **Гайнутдинов, Р.Ф.** Проведение исследовательских испытаний экспериментальных образцов текстильных материалов, применяемых для производства специальной одежды / Р.Ф. Гайнутдинов, В.В. Хамматова // Вестник Казанского технологического университета. – 2016. –Т.19. – № 3. – С. 78-82.
7. **Гайнутдинов, Р.Ф.** Изготовление экспериментальной партии образцов наноструктурированных текстильных материалов с повышенными гигиеническими свойствами Р.Ф. Гайнутдинов, В.В. Хамматова // Вестник Казанского технологического университета. – 2016. –Т.19. – № 4. – С. 81-83.
8. Хамматова, Э.А. Повышение эксплуатационных свойства текстильных материалов для спецодежды за счет применения технологического процесса плазменной модификации /Э.А. Хамматова, **Р.Ф. Гайнутдинов**, В.В. Хамматова, А.К. Васильева, Ю.Н. Матвеев //Вестник Казанского технологического университета. – 2017. – Т.20. – № 24. – С. 83-86.

9. Хамматова, Э.А. Разработка нового поколения полипропиленовых нетканых материалов специального назначения для изготовления бактерицидной одежды / Э.А. Хамматова, **Р.Ф. Гайнутдинов**, В.В. Хамматова, А.К. Васильева, Ю.Н. Матвеев // Вестник Казанского технологического университета. – 2017. – Т.20. – № 24. – С. 89-92.
10. **Гайнутдинов, Р.Ф.** Разработка прочных текстильных материалов для многофункциональной специальной одежды / Р.Ф. Гайнутдинов, Э.А. Хамматова // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2018. – № 4 (376). – С. 59–63.
11. **Гайнутдинов, Р.Ф.** Влияние потока плазмы на повышение физико-механических свойств технических материалов / Р.Ф. Гайнутдинов, В.В. Хамматова // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2020. – № 6 (390). – С. 56–62.
12. **Гайнутдинов, Р.Ф.** Исследование свойств высокопрочного текстильного материала для защитной одежды с содержанием химических волокон / Р.Ф. Гайнутдинов, Л.В. Титова, В.В. Хамматова, Э.А. Хамматова // Химические волокна. – 2021. – № 2. – С. 55–59.
13. Хамматова, В.В. Методы наномодифицирования коллоидным раствором наночастиц серебра текстильных материалов для специальной одежды / В.В. Хамматова, **Р.Ф. Гайнутдинов** // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2022. – № 1 (397). – С. 201–205.
14. **Гайнутдинов, Р.Ф.** Наноструктурирование полутьняной парусиновой ткани для повышения качества спецодежды / Р.Ф. Гайнутдинов, В.В. Хамматова // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2022. – № 5 (401). – С. 71–77.
15. **Гайнутдинов, Р.Ф.** Повышение качества суконной ткани для спецодежды после наноструктурирования плазмой / Р.Ф. Гайнутдинов, Э.А. Хамматова // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2022. – № 4 (400). – С. 69-76.
16. **Гайнутдинов, Р.Ф.** Повышение качества кожевенных материалов для спецодежды за счет применения плазменной обработки / Р.Ф. Гайнутдинов, В.В. Хамматова // Известия вузов. Технология легкой промышленности. – 2023. – № 1. – С. 93-97.
17. **Гайнутдинов, Р.Ф.** Разновидности умного текстиля в легкой промышленности / Р.Ф. Гайнутдинов, А.Ю. Пацукова, В.В. Хамматова // Вестник МГХПА. – 2023. – № 1. – С. 239-244.
18. **Гайнутдинов, Р.Ф.** Использование коллоидного раствора наночастиц серебра в текстильных материалах для специальной одежды / Р.Ф. Гайнутдинов, В.В. Хамматова // Вестник Казанского технологического университета. – 2023. – Т.26. – № 10. – С. 129-136.
19. **Gainutdinov, R.F.** Production of multifunctional textile material using plasma and metal nanoparticles / R.F. Gainutdinov, N.S. Klimova, V.V. Khammatova, E.A. Khammatova // Fibre Chem, Vol. 55, No. 2, July, 2023 (Russian Original No. 2, March-April, 2023). - P.132-134.
20. **Гайнутдинов, Р.Ф.** Повышение качества спецодежды из наноструктурированных одежных кожевенных материалов / Р.Ф. Гайнутдинов, Э.А. Хамматова // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2023. – № 2 (404). – С. 92-97.

21. **Гайнутдинов Р.Ф.** Обеспечение требуемого уровня качества спецодежды из наномодифицированных тканей /Р.Ф. Гайнутдинов, В.В. Хамматова //Известия вузов. Технология текстильной промышленности», Иваново. – 2023 г. – № 5 (407). – С.80-86.
22. **Гайнутдинов Р.Ф.** Технология повышения водоупорности суконной ткани для спецодежды /Р.Ф. Гайнутдинов, В.В. Хамматова //Известия вузов. Технология текстильной промышленности», Иваново. – 2024. – № 2(410). – С.72-78.

**Публикации в научных журналах,  
индексируемых в базе данных Scopus / Web of Science**

23. **Gainutdinov, R.F.** Properties of high - strength aramid fiber textile materials for protective clothing / R.F. Gainutdinov, E.A. Khammatova, V.V. Khammatova, L.V. Titova // Fibre Chemistry. – 2021. –Vol. 53. –№. 3. - С. 204-207.
24. **Гайнутдинов, Р.Ф.** Исследование свойств высокопрочного текстильного материала для защитной одежды с содержанием химических волокон / Р.Ф. Гайнутдинов, Л.В. Титова, В.В. Хамматова, Э.А. Хамматова //Химические волокна. – 2021. – № 2. – С. 55–59.
25. **Гайнутдинов, Р.Ф.** Получение многофункционального текстильного материала с использованием плазмы и наночастиц металла / Р.Ф. Гайнутдинов, Н.С. Климова, В.В. Хамматова, Э.А. Хамматова // Химические волокна. – 2023. – № 2. – С. 74-76.

**Монографии**

26. Хамматова, Э.А. Разработка технологий производства модифицированных композиционных волокнистых материалов, применяемых в нефтехимическом и нефтеперерабатывающем комплексах / Э.А. Хамматова, **Р.Ф. Гайнутдинов**, Ю.Н. Матвеев. – Казань: Изд-во КНИТУ, 2016. – 264 с.
27. Хамматова, Э.А. Совершенствование технологии промышленного производства конкурентоспособных материалов нового поколения /Э.А. Хамматова, **Р.Ф. Гайнутдинов**, Ю.Н. Матвеев. – Казань: Изд-во КНИТУ, 2017. – 312 с.
28. Хамматова, Э.А. Технологии производства конкурентоспособных текстильных материалов для специальной одежды (Дизайн костюма) / Э.А. Хамматова, **Р.Ф. Гайнутдинов**, В.В. Хамматова, К.Э. Разумеев. – Казань: Изд-во КНИТУ 2018. – 198 с.
29. Хамматова, Э.А. Функциональные материалы технического назначения / Э.А. Хамматова, **Р.Ф. Гайнутдинов**. – Казань: Изд-во КНИТУ, 2020. – 142 с.
30. Хамматова, Э.А. Разработка антибактериального модифицированного перевязочного материала с применением наночастиц серебра /Э.А. Хамматова, **Р.Ф. Гайнутдинов**. – Казань: Изд-во «КНИТУ», 2021. – 108 с. – ISBN 978-5-7882-3076-4.
31. Хамматова, В.В. Мировой рынок текстиля и специальной одежды: состояние и тенденции развития /В.В. Хамматова, **Р.Ф. Гайнутдинов**. – Казань: Изд-во «КНИТУ», 2022. – 137 с.

**Другие публикации в материалах конференций и сборниках:**

32. **Гайнутдинов, Р.Ф.** Экспериментальные образцы спецодежды из наномодифицированных материалов меховой овчины, обработанных с использованием коллоидного раствора наночастиц серебра / Р.Ф. Гайнутдинов //Материалы статей Межд.

- научно-практ. конф. «Техническое регулирование: базовая основа качества материалов, изделий и услуг». – Шахты, ИСОиП. ДГТУ, 2016. – С. 207-212.
33. **Гайнутдинов, Р.Ф.** Разработка технологии крашения и наномодифицирования меховой овчины для производства утепленной спецодежды / Р.Ф. Гайнутдинов // Материалы статей II Межд. научно-практ. конф. «Модели инновационного развития текстильной и легкой промышленности на базе интеграции университетской науки и индустрии». – Казань, КНИТУ, 2016. – С. 152-157.
34. **Гайнутдинов, Р.Ф.** Проведение исследовательских испытаний стойкости к истиранию экспериментальных образцов наноструктурированных текстильных материалов, применяемых в одежде специального назначения / Р.Ф. Гайнутдинов, В.В. Хамматова // Сборник статей XVIII Межд. научно-практ. семинара «Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы» (SMARTEX - 2016). Часть 1. – Иваново, ИВГПУ, 2016. – С. 52-56.
35. **Гайнутдинов, Р.Ф.** Испытания стойкости к нефти экспериментальных образцов текстильных материалов для одежды нефтяников / Р.Ф. Гайнутдинов, В.В. Хамматова // Сборник статей Российско-американской научн. школы-конф. «Моделирование и оптимизация химико-технологических процессов «РАШХИ-2016». – Казань, КНИТУ, 2016. – С. 136-141.
36. **Гайнутдинов, Р.Ф.** Анализ микроструктуры образцов наномодифицированных текстильных материалов, применяемых для спецодежды / Р.Ф. Гайнутдинов, В.В. Хамматова // Сборник статей Межд. научн. - техн. конф. «Дизайн, технологии и инновации в текстильной и легкой промышленности. (ИННОВАЦИИ-2016)». – М.: МГУДТ, 2016. – С. 115-119.
37. **Гайнутдинов, Р.Ф.** Разработка одежды специального назначения из наноструктурированных материалов / Р.Ф. Гайнутдинов, В.В. Хамматова // Сборник научной сессии. – Казань: Изд-во КНИТУ. – 2017. – С. 355.
38. Хамматова, Э.А. Повышение механических свойств специальной защитной одежды с использованием наномодифицированных текстильных материалов / Э.А. Хамматова, **Р.Ф. Гайнутдинов**, Ю.Н. Матвеев // Сборник статей II Межд. научно-практического симпозиума «Наука — текстильному производству: новейшие отраслевые научные разработки в сфере технического текстиля и практический опыт их применения». – М.: Изд-во «БОС», 2017. – С. 150-158.
39. **Гайнутдинов, Р.Ф.** Метод повышения стойкости текстильных материалов для спецодежды к агрессивным средам / Р.Ф. Гайнутдинов, В.В. Хамматова // Сборник статей XIV Межд. научно-практ. конф. студ. и молодых ученых «Новые технологии и материалы легкой промышленности». – Казань, КНИТУ, 2017. – С. 316-320.
40. Хамматова, Э.А. Современные технологии обработки текстильных материалов для производства тканей для специальной одежды / Э.А. Хамматова, **Р.Ф. Гайнутдинов**, В.В. Хамматова // Сборник статей II Межд. научно-практ. симпозиума «Наука — текстильному производству: новейшие отраслевые научные разработки в сфере технического текстиля и практический опыт их применения». – М.: Изд-во «БОС», 2017. – С. 202-211.
41. Хамматова, Э.А. Технологический процесс изготовления образцов модифицированных текстильных материалов / Э.А. Хамматова, **Р.Ф. Гайнутдинов**, В.В. Хамматова, А.К. Василева, Ю.Н. Матвеев // Сборник статей II Межд. научно-практ. конф. молодых ученых и спец. «Инновационное развитие легкой промышленности». – Казань, КНИТУ, 2017. – С. 77-85.

42. Хамматова, Э.А. Метод придания полипропиленовым нетканым материалам antimicrobial и прочностных свойств / Э.А. Хамматова, **Р.Ф. Гайнутдинов**, В.В. Хамматова, А.К. Василева, Ю.Н. Матвеев // Сборник статей II Межд. научно-практ. конф. молодых ученых и спец. «Инновационное развитие легкой промышленности». – Казань, КНИТУ, 2017. – С. 69-77.
43. Гайнутдинов, Р.Ф. Анализ требований к материалам защитных швейных изделий специального назначения / **Р.Ф. Гайнутдинов**, В.В. Хамматова // Сборник статей VIII Межд. научно-практ. конф. «Проблемы дизайн-проектирования и оформления мусульманской и национальной одежды». – Казань, КНИТУ, 2018. – С. 86-89.
44. Хамматова, Э.А. Проведение экспериментальных исследований эксплуатационных характеристик, модифицированных композиционных текстильных материалов для одежды специального назначения / Э.А. Хамматова, **Р.Ф. Гайнутдинов**, В.В. Хамматова, А.К. Василева, Ю.Н. Матвеев // Сборник статей VIII Межд. научно-практ. конф. «Проблемы дизайн-проектирования и оформления мусульманской и национальной одежды». – Казань, КНИТУ, 2018. – С. 99-102.
45. Хамматова, Э.А. Разработка наномодифицированных нетканых материалов для изготовления бактерицидной одежды специального назначения / Э.А. Хамматова, **Р.Ф. Гайнутдинов**, В.В. Хамматова, А.К. Василева, Ю.Н. Матвеев // Текстильная и легкая промышленность. – 2018. – № 1. – С. 23–26.
46. Хамматова, Э.А. Технологический процесс производства композиционных текстильных материалов для спецодежды с повышенными эксплуатационными свойствами / Э.А. Хамматова, **Р.Ф. Гайнутдинов**, В.В. Хамматова, А.К. Василева, Ю.Н. Матвеев // Текстильная и легкая промышленность. – 2018. – № 1. – С. 26–29.
47. Хамматова, Э.А. Совершенствование технологии создания материалов многофункционального технического назначения / Э.А. Хамматова, **Р.Ф. Гайнутдинов**, В.В. Хамматова, А.К. Василева, Ю.Н. Матвеев // Текстильная и легкая промышленность. – 2018. – № 3-4. – С. 25–30.
48. Хамматова, Э.А. Разработка технологий производства многофункциональных композиционных текстильных материалов и их практическая реализация в отраслях экономики российской федерации / Э.А. Хамматова, **Р.Ф. Гайнутдинов**, В.В. Хамматова, А.К. Василева, Ю.Н. Матвеев // Текстильная и легкая промышленность. – 2018. – № 3-4. – С. 23–24.
49. Гайнутдинов, Р.Ф. Экспериментальные исследования стойкости к истиранию образцов натуральных текстильных материалов, наноструктурированных потоком низкотемпературной плазмы / **Р.Ф. Гайнутдинов**, В.В. Хамматова // Сборник статей симпозиума «Современные инженерные проблемы ключевых отраслей промышленности» в рамках Международного научно-технического форума // Вторые международные Косыгинские чтения». – М.: РГУ им А.Н. Косыгина, 2019. – С. 64-70.
50. **Гайнутдинов, Р.Ф.** Нанотехнологические методы придания текстильным бактерицидных свойств материалам / Р.Ф. Гайнутдинов, В.В. Хамматова // Сборник статей XXII Межд. научно-практ. форума «Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы» (SMARTEX – 2019). – Иваново, ИВГПУ, 2019. – С. 300-303.
51. **Гайнутдинов, Р.Ф.** Повышение стойкости к истиранию натуральных текстильных материалов при воздействии потока низкотемпературной плазмы / Р.Ф. Гайнутдинов, В.В. Хамматова // Сборник статей Всеросс. научно-техн. конф. «Фундаментальные и прикладные проблемы создания материалов и аспекты тех-

нологий текстильной и легкой промышленности». – Казань, КНИТУ, 2019. – С. 135-139.

52. **Гайнутдинов, Р.Ф.** Разработка текстильных материалов с повышенной стойкостью к химическим реактивам для изделий специального назначения / Р.Ф. Гайнутдинов, В.В. Хамматова // Материалы XV Международной научно-практической конференции с элементами научной школы для студентов и молодых ученых «Новые технологии и материалы легкой промышленности». – Казань, КНИТУ, 2019. – С. 131-139.

53. **Гайнутдинов, Р.Ф.** Исследование пористости текстильных материалов для специальной одежды / Р.Ф. Гайнутдинов, В.В. Хамматова // Сборник научных трудов Всеросс. научно – практ. конф. «Научные исследования и разработки в области дизайна и технологий». – Кострома, КГУ, 2020. – С. 158-161.

54. **Гайнутдинов, Р.Ф.** Технологический процесс отделки текстильных материалов с использованием потока «холодной» плазмы пониженного давления / Р.Ф. Гайнутдинов, В.В. Хамматова // Сборник статей VI Межд. научно-техн. конф. «Дизайн, технологии и инновации в текстильной и легкой промышленности» (ИННОВАЦИИ-2020). Часть 1. – М: РГУ им А.Н. Косыгина, 2020. – С. 33-36.

55. **Гайнутдинов, Р.Ф.** Разработка технологии наномодифицирования натуральной кожи коллоидным раствором наночастиц серебра для придания бактерицидных свойств / Р.Ф. Гайнутдинов // Сборник статей VI Межд. научно-техн. конф. «Дизайн, технологии и инновации в текстильной и легкой промышленности» (ИННОВАЦИИ-2020). Часть 1. – М: РГУ им А.Н. Косыгина, 2020. – С. 36-41.

56. **Гайнутдинов, Р.Ф.** Технология наноструктурирования полульняной парусины для повышения прочности спецодежды / Р.Ф. Гайнутдинов, В.В. Хамматова // Сборник статей XXIII Межд. научно-практ. форума «Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы» (SMARTEX - 2020). – Иваново, ИВГПУ, 2020. – С. 153-158.

57. **Гайнутдинов, Р.Ф.** Разработка качественных материалов для униформы с повышенными механическими / Р.Ф. Гайнутдинов, Ф.С. Шарифуллин, Л.Н. Абуталипова // Материалы XVIII Всеросс. научно – практ. конф. с элементами науч. школы для студ. и молодых ученых «Новые технологии и материалы легкой промышленности». – Казань, КНИТУ, 2022. – С. 221-224.

58. **Гайнутдинов, Р.Ф.** Плазменные методы обработки материалов легкой промышленности для улучшения качества и свойств / Р.Ф. Гайнутдинов, В.В. Хамматова // Материалы XIX Всеросс. научно – практ. конф. с элементами науч. школы для студ. и молодых ученых «Новые технологии и материалы легкой промышленности». – Казань, КНИТУ, 2023. – С. 288-291.

59. **Гайнутдинов Р.Ф.** Повышение качества бактерицидной отделки в натуральной коже для спецодежды / Р.Ф. Гайнутдинов // Материалы статьи I Всеросс. конф. ученых, аспирантов и студентов с межд. участием «Новации в процессах проектирования и производства изделий легкой промышленности». – Казань, КНИТУ, 2023. – С. 134-136.

Соискатель



Р.Ф. Гайнутдинов

Заказ №

Тираж 100 экз.

Офсетная лаборатория КНИТУ

420015 г. Казань, ул. К. Маркса, 68