На правах рукописи



РЕПИНА МАРИНА ВИКТОРОВНА

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ СОРБЦИОННЫМИ И МЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ ЛУБЯНЫХ ВОЛОКОН НА ОСНОВЕ ПЛАЗМЕННОЙ ИНЖЕНЕРИИ

2.6.16. Технология производства изделий текстильной и легкой промышленности

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань 2026

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

Научный руководитель:	**Хамматова Эльмира Айдаровна**, доктор технических наук, доцент
Официальные оппоненты:	**Шустов Юрий Степанович**, доктор технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)», заведующий кафедрой материаловедения и товарной экспертизы, профессор; **Гайсин Азат Фивзатович**, доктор технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет», профессор кафедры физики.
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный химико-технологический университет», г. Иваново.

Защита диссертации состоится 29.12.2026 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/servlet/contentblob?id=600124.

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», ученому 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) (п. 28 Положения о присуждении ученых степеней).

Автореферат разослан «___» _____ 2026 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук — Н.В. Тихонова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время в мировой текстильной индустрии наблюдается устойчивый рост интереса к изделиям из натуральных тканей, обусловленный требованиями безопасности и повышением потребительских свойств продукции. В поле зрения производителей и потребителей попадают не только традиционные культуры, такие как лен и хлопок, но и менее распространенные лубяные волокна – техническая конопля, джут, крапива и кенаф, которые представляют собой возобновляемое и биоразлагаемое сырьё, текстильные материалы из этих волокон обладают высокой воздухопроницаемостью, гигроскопичностью, отсутствием вредных выделений при эксплуатации и комфортностью в процессе носки. Лубяные волокна могут быть альтернативой импортного хлопка, для роста которого российские климатические условия являются неподходящими, что делает техническую коноплю, стратегически важным сырьем для отечественной текстильной промышленности. Текстильным материалам из технической конопли присуща естественная защита от бактерий, грибков и ультрафиолетового излучения.

Своевременность развития технологий производства текстиля из конопли обусловлена ростом посевных площадей в разных регионах Российской Федерации. Выращиваемая конопля используется в основном для пищевой и строительной отрасли, производства первичной костры на экспорт, текстильный сектор занимает незначительную долю. Технологии глубокой переработки конопляной костры неразвиты, техническая конопля на данный момент не задействована в промышленном производстве в полном объеме. Такую продукцию, при наличии возможности глубокой переработки, могут представлять изделия из технической конопли в самых разных потребительских сферах.

В России выведены сорта конопли, с содержанием целлюлозы в стебле до 77%, что делает их ценным сырьем для целлюлозосодержащей продукции и определяет перспективность и целесообразность использования в текстильном производстве. Государством предусмотрены многочисленные меры поддержки, включающие льготное кредитование проектов по глубокой переработке конопли и возмещение части затрат на покупку основных средств. Приоритеты экономической политики России состоят не только в ускоренном импортозамещении, но и в необходимости стимулирования выпуска экспортной продукции. Постановление Правительства РФ от 13.05.2022 г. № 872 называет техническую коноплю альтернативой хлопку при производстве тканей, а также нефти при получении пластика и стекловолокна при производстве композитных материалов.

Тема диссертационного исследования полностью отвечает требованиям программы "Прогноз долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2030 года" в части решения проблем, обеспечения текстильных производств качественным сырьем, а также уменьшения зависимости от хлопкового сырья.

Необходима разработка технологий, обеспечивающих переход к широкому использованию технических конопляных волокон в текстильной промышленности. Многие технологии модификации текстильных материалов для придания требуемых потребительских и эксплуатационных свойств, основаны на применении агрессивных химических реагентов, кислот, гидроксидов, органических растворителей, отходы подобного производства загрязняют окружающую среду. Кроме того, подобные методы модификации позволяют ограниченно и не всегда целенаправленно улучшать потребительские и эксплуатационные свойства текстильных материалов, а также могут приводить к деструкции структуры материалов.

В этой связи особую актуальность приобретают электрофизические методы модификации, в частности обработка неравновесной низкотемпературной плазмой пониженного давления. Как показали исследования, плазменная обработка, в отличие от химического метода модификации, изменяет только поверхностный слой хлопчатобумажных и льняных текстильных материалов, не затрагивая его внутреннюю структуру и сохраняя основные физико-механические характеристики исходного целлюлозного полимера. Важнейшими преимуществами плазменного метода являются экологическая чистота, отсутствие жидких отходов, универсальность, возможность модификации материалов различной природы, а также целенаправленного управления свойствами их поверхности, путём варьирования параметров разряда и состава плазмообразующего газа.

Вместе с тем, для текстильных материалов из технической конопли отсутствует экспериментальные исследования выбора режимов плазменной обработки, обеспечивающие сбалансированное улучшение физико-механических свойств. Это определяет актуальность настоящего диссертационного исследования, направленного на разработку технологии управления сорбционными и механическими свойствами текстильных материалов из лубяных волокон технической конопли на основе плазменной инженерии.

Степень разработанности темы исследования. Теоретические и прикладные аспекты применения плазменных технологий в текстильной и легкой промышленности получили развитие в трудах ведущих представителей ивановской научной школы – Б.Л. Горберга, А.И. Максимова, Б.Н. Мельникова. Б.Л. Горбергом обоснованы принципы целенаправленного изменения свойств текстильных материалов при воздействии электрических полей и плазменных разрядов. Другим ключевым центром компетенций в России является казанская научная школа на базе ФГБОУ ВО «КНИТУ». Основатели направления плазменной модификации – И.Ш. Абдуллин и Л.Н. Абуталипова. Впоследствии эти исследования были продолжены и развиты в работах В.В. Хамматовой, Э.А. Хамматовой, А.А. Азановой, И.В. Красиной и других ученых.

Несмотря на значительное количество исследований, направленных на изучение влияния пламенной обработки на текстильные материалы, отсутствуют научные работы, исследующие процесс плазменной модификации текстильных материалов из волокон технической конопли.

Работа выполнена в Казанском национальном исследовательском технологическом университете. Автором при работе над диссертацией использовались методики и аналитическое оборудование комплексной лаборатории «Наноаналитика» (ЛК Наноаналитика) ФГБОУ ВО «КНИТУ».

В диссертационной работе изложены результаты научных исследований автора с 2023 по 2026 гг. в области разработки технологии управления сорбционными и механическими свойствами текстильных материалов из лубяных волокон на основе плазменной инженерии.

Область исследования соответствует паспорту научной специальности 2.6.16. Технология производства изделий текстильной и легкой промышленности: п.2. Проектирование структуры и прогнозирование показателей свойств и качества волокон, нитей, материалов и ИТЛП; п.19. Разработка новых материалов, обеспечивающих высокие эксплуатационные свойства ИТЛП; п.20. Воздействие излучений и плазмы на волокнообразующие полимеры природного и синтетического происхождения, волокна, ткани, кожевенно-меховые и другие ИТЛП.

Цель и задачи работы. Целью работы является разработка научно обоснованной технологии плазменной обработки текстильных материалов из волокон технической конопли, обеспечивающей целенаправленное управление их сорбционными и механическими свойствами.

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

1. Провести анализ актуальных исследований в сфере управления свойствами текстиля и оценки регулирующего потенциала плазменной модификации при изменении параметров разряда пониженного давления.

2. Обосновать и провести выбор объектов, методов и методик исследований для определения сорбционных и механических свойств текстильных материалов из волокон технической конопли.

3. Провести теоретические и экспериментальные исследования комплекса показателей, обуславливающих сорбционную способность и механические характеристики текстильных материалов из волокон технической конопли, подвергнутых обработке потоком низкотемпературной плазмы пониженного давления.

4. Разработать технологические рекомендации по направленному плазменному модифицированию текстильных материалов в процессах производства текстиля из волокон технической конопли.

Научная новизна работы

1. Установлено, что при выбранных параметрах плазменного воздействия химическая активация волокон технической конопли отсутствует. Плазменная обработка вызывает выраженное наноструктурирование волокон, что обеспечивает увеличение удельной поверхности.

2. При плазменной обработке волокон технической конопли наблюдается уменьшение аморфной доли и рост упорядоченности надмолекулярной структуры целлюлозы I.

3. Разработана научно обоснованная технология целенаправленного модифицирования поверхности текстильных материалов из волокон технической конопли. Выявлена нелинейная зависимость между параметрами плазменной обработки (видом газа и временем воздействия) и структурой материала.

4. Установлено, что обработка плазменным ВЧЕ разрядом в среде азота приводит к разволокнению поверхности волокна технической конопли, что улучшает капиллярность текстильного материала.

Теоретическая и практическая значимость работы.

1. Определены технологические параметры потока низкотемпературной плазмы пониженного давления, позволяющие повысить сорбционные и механические свойства текстильных материалов из волокон технической конопли. Установлены количественные характеристики режима плазменного структурирования, при которых наблюдается улучшение механических и сорбционных свойств.

2. Разработаны рекомендации по применению потока плазмы пониженного давления для модификации текстильных материалов из волокон технической конопли в изделиях различного назначения.

3. Теоретические и методологические положения работы использованы на предприятиях текстильной и легкой промышленности РФ. Результаты диссертационной работы внедрены в АО «Егорьевск-обувь».

Общая характеристика объектов и методов исследований. В качестве объектов исследования выбраны: 1. образец ткани из 100% конопли полотняного переплетения; 2. образец ткани, содержащей 55% конопли и 45% хлопка полотняного переплетения; 3. образец ткани, содержащей 80% конопли и 20% хлопка саржевого переплетения; 4. образец трикотажной ткани из 100% конопли; 5. образец трикотажной ткани из 55% конопли и 45% хлопка; 6. образец трикотажной ткани из 53% конопли, 44% хлопка и 3% спандекса.

Плазменная обработка текстильных материалов из волокон технической конопли. проводились на установке ВЧЕ разряда пониженного давления и плазменной установке «ВАТТ 4000 ПТ ПЛАЗМА». В качестве плазмообразующих газов использовали воздух, аргон и азот, время экспозиции составило от 3 до 12 минут.

Для исследования показателей сорбционных и механических свойств текстильных материалов из волокон технической конопли использовались следующие методики. Определение разрывной нагрузки проводили по ГОСТ 3813-72, измерение напряжения электрического поля – по ГОСТ 32995-2014, определение капиллярности и гигроскопичности – по ГОСТ 3816-81, определение устойчивости к истиранию полотен по методу Мартиндейла по ГОСТ Р ИСО 12947-1-2011, ГОСТ Р ИСО 12947-2-2011, жесткости на изгиб по ГОСТ 10550-93, воздухопроницаемость по ГОСТ 12088-77.

В рамках исследования структуры текстильных материалов применялись: конфокальная лазерная сканирующая микроскопия, электронная сканирующая микроскопия, ИК- спектроскопия и рентгенофлуоресцентный анализ.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Экспериментально обоснованные закономерности целенаправленного управления качеством текстильных материалов из волокон технической конопли и возможности регулирования свойств тканей из технической конопли путём варьирования параметров плазменного воздействия в плазмообразующих средах аргона, воздуха и азота.

2. Результаты исследования оценки влияния плазменной обработки на структуру текстильных материалов из волокон технической конопли.

3. Технологические рекомендации по получению наноструктурированных текстильных материалов из волокон технической конопли.

Достоверность полученных результатов и выводов гарантируется применением сертифицированного измерительного оборудования и стандартизованных методик контроля, проведением оценки точности измерений, а также непротиворечивостью теоретических выкладок и экспериментальных данных. Статистическая значимость результатов подтверждена обработкой выборки методами математической статистики при доверительной вероятности 0,95.

Апробация работы и публикации. Основные положения работы обсуждались и докладывались на конференции «Традиции и инновационные процессы в индустрии моды» (Уфа, 2025), VI Всероссийской научной студенческой конференции с международным участием «Инновационные текстильные технологии. Перспективы развития» (Москва, 2025), Всероссийской научно-практической конференции «Традиции и инновационные процессы в индустрии моды» (Уфа, 2025), XIV Международной научно-практической конференции "Science and modernity" (Москва, 2026), XXVII Международной научно-практической конференции «Современные исследования: теория, практика, результаты» (Москва, 2026), XXXII Международной научно-практической конференции «Устойчивое развитие общества: новые научные подходы и исследования» (Москва, 2026), XXXV Международной научно-практической конференции «Актуальные научные исследования» (Москва, 2026), XXXI международной научно-практической конференции ««Актуальные аспекты развития науки и общества в эпоху цифровой трансформации» (Москва, 2026).

Личный вклад автора заключается в отборе и обосновании методик экспериментов; личном участии в их проведении; анализе и обобщении полученных экспериментальных результатов, разработке рекомендаций по использованию плазменной обработки в технологическом процессе изготовления конопляного текстиля. Вклад автора является основным при выполнении работы на всех стадиях.

Публикации. Результаты работы отражены в 12 печатных работах, в том числе в 3 статьях, входящих в перечень научных журналов и изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, 9 в материалах конференций различного уровня.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка использованной литературы, 3 приложений. Работа изложена на 165 страницах машинописного текста и содержит 24 таблицы, 33

рисунка. В тексте приведены ссылки на 120 литературных источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследования: растущий спрос на экологичный текстиль, роль технической конопли в импортозамещении и преимущества плазменной модификации перед химическими аналогами. В разделе также представлены цель, задачи и научная новизна диссертационного исследования.

В первой главе описаны структурные и морфологические характеристики лубяных волокон, как объектов плазменной модификации. В ней охарактеризованы физико-механические и структурные свойства волокна, дан обзор методов его обработки и проанализирован рынок технической конопли в России и мире. На основе представленного сформулированы задачи исследования.

Во второй главе Обоснован выбор 6 образцов для исследований: ткани полотняного переплетения (100% конопли; 55% конопли + 45% хлопка), ткань саржевого переплетения (80% конопли + 20% хлопка) и трикотажные полотна (100% конопли; 55% конопли + 45% хлопка; 53% конопли + 44% хлопка + 3% спандекса). Описаны плазменные установки, методики проведения экспериментов и аппаратура. Проведен расчет статических погрешностей измерений.

В третьей главе представлены результаты исследований влияния потока низкотемпературной плазмы пониженного давления на комплекс механических и сорбционных свойств и структуру, и морфологию текстильных материалов из технической конопли.

Текстильные материалы из технической конопли обрабатывались на установке ВЧЕ разряда, где создавался поток неравновесной низкотемпературной плазмы пониженного давления. Процесс плазменного структурирования осуществлялся в вакуумной среде при подаче на электроды напряжения мощностью 1,2 кВт в среде плазмообразующих газов аргона, азота и воздуха. Расход плазмообразующих газов составил 2000 см³/с. При температуре 20 °С массовый расход для плазмообразующих газов равен: для аргона 3,32 г/с, для азота 2,33 г/с и 2,4 г/с для воздуха. Время экспозиции составило от 3 до 12 минут. Остаточное давление в камере ВЧЕ разряда пониженного давления составило 20 Па, частота генератора установки равна 13,56 МГц.

Проведено экспериментальное исследование показателей разрывной нагрузки, разрывного удлинения, стойкости к истиранию, гигроскопичности, краевого угла смачивания, времени впитывания капли и капиллярности текстильных материалов из технической конопли после проведения плазменной обработки. Дополнительно определены показатели напряженности электрического поля. Выполнено исследование устойчивости показателей гигроскопичности и разрывной нагрузки текстильных материалов из волокон технической конопли после плазменной обработки.

Для разработки технологии управления сорбционными и механическими свойствами текстильных материалов из волокон технической конопли применен

квалиметрический метод выбора режимов плазменной обработки. Проведена квалиметрическая оценка режимов плазменной обработки тканей, учитывающая выбор плазмообразующего газа и длительность обработки для текстильных материалов полотняного переплетения из 100% технической конопли, а также трикотажа.

Квалиметрический показатель выбора оптимального режима плазменной обработки включал совокупность показателей сорбционных и механических свойств текстильных материалов из волокон технической конопли с учетом их весовых характеристик (1). Весовые коэффициенты показателей были определены исходя из стратегии направленного улучшения разрывной нагрузки и гигроскопичности текстильных материалов бытового назначения посредством плазменной модификации. Для расчета квалиметрического показателя использованы относительные изменения (в %) сорбционных и прочностных характеристик текстильных материалов из технической конопли в сравнении с исходными материалами.

$$K=0,19\cdot K_{ор,осн}+0,19\cdot K_{ор,ут}+0,04\cdot K_{оу}+0,04\cdot K_{и}+0,38\cdot K_{г} +0,05\cdot K_{к,осн}+0,05\cdot K_{к,ут}+0,06\cdot K_{в}, \quad (1)$$

где K – квалиметрический показатель, %;

$K_{ор,осн}$ - показатель относительной разрывной нагрузки по основе или вдоль петельных рядов, %;

$K_{ор,ут}$ - показатель относительной разрывной нагрузки по утку или вдоль петельных рядов, %;

$K_{оу}$ - показатель относительного разрывного удлинения, %;

$K_{и}$ - показатель относительной стойкости к истиранию, %;

$K_{г}$ - показатель относительной гигроскопичности, %;

$K_{к,осн}$ - показатель относительной капиллярности по основе или вдоль петельных рядов, %;

$K_{к,ут}$ – показатель относительной капиллярности по утку или поперек петельных рядов, %;

$K_{в}$ - показатель относительного времени впитывания капли, %.

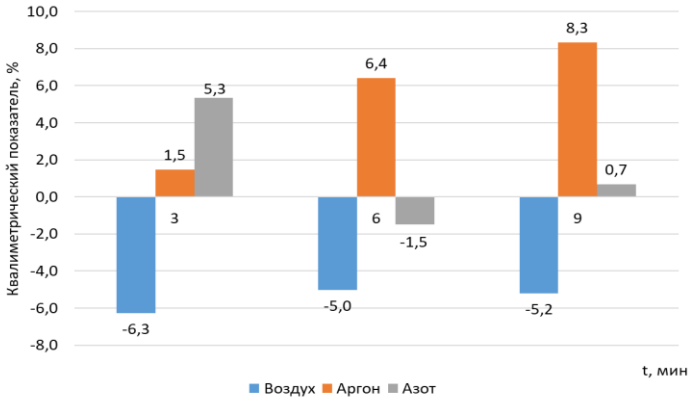


Рисунок 1 – Влияние режимов плазменной обработки (состава газа и времени экспозиции) на квалиметрический показатель текстильных материалов полотняного переплетения из 100% технической конопли

Установлено, что для улучшения показателей разрывной нагрузки и гигроскопичности текстильного материала полотняного переплетения из 100% технической конопли целесообразно проводить плазменную обработку в среде аргона в течение 9 минут, в данном режиме значение квалиметрического показателя является наибольшим и составляет 8,3% (рисунок 1).

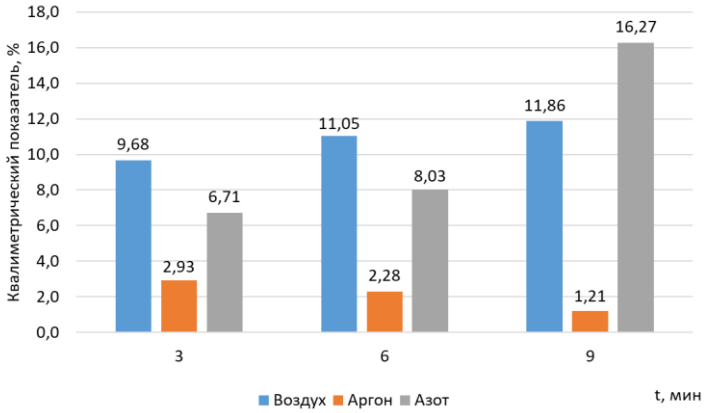


Рисунок 2 – Влияние режимов плазменной обработки (состава газа и времени экспозиции) на квалиметрический показатель для трикотажного текстильного материала из 100% технической конопли

Анализ квалиметрических показателей трикотажа из 100% технической конопли показал, что наиболее эффективной является обработка в воздушной среде, тогда как плазменная обработка в среде аргона дала минимальные результаты. Максимальное значение квалиметрического показателя, 16,27%, соответствует режиму обработки в среде азота в течение 9 минут (рисунок 2).

Для комплексной оценки влияния низкотемпературной плазменной модификации на структурно-морфологические характеристики текстильных материалов на основе волокон технической конопли был реализован комплекс взаимодополняющих методов анализа.

Исследованию подвергались серии образцов, продемонстрировавшие наиболее выраженную положительную динамику механических и сорбционных свойств после проведения плазменной обработки.

Дифрактограммы всех образцов характеризуются выраженными дифракционными рефлексами в угловых диапазонах 2θ = 14,80 – 16,50, соответствующих наложению плоскостей ($1\bar{1}0$) и (110) и интенсивным пиком при 2θ = 22,60 - 22,90, советующим плоскости (200), что подтверждает сохранение структуры целлюлозы I. При этом плазменная модификация не вызывает фазовых переходов в полиморфные модификации целлюлозы II или аморфизацию исходной структуры.

При проведении рентгенографии исследована степень упорядоченности и размеры зон упорядоченности целлюлозы, динамика показателя полуширины на половине высоты. По всем парам образцов «контроль – плазмообработанный» фиксировалось снижение интегральной полуширины дифракционного макси-

мума, повышение степени упорядоченности, рост размера зоны упорядоченной структуры целлюлозы.

Плазменная обработка текстильных материалов в аргоновой среде в течение 9 минут продемонстрировала наиболее существенное повышение степени упорядоченности, достигающее 83-97% по сравнению с необработанными образцами. Кроме того, данный режим обработки также привел к значительному увеличению разрывной нагрузки и улучшению износостойкости.

По результатам проведения инфракрасной спектрометрии составлена таблица 1 с данными по степени изменения спектральных параметров образцов после плазменной обработки, где ΔТ – разница между значениями показателя пропускания образца после плазменной обработки и контрольного образца (2):

$$\Delta T = T_{нтп} - T_{ко}, \quad (2)$$

где $T_{нтп}$ – показатель пропускания образца после низкотемпературной плазменной обработки;

$T_{ко}$ – показатель пропускания контрольного образца.

Данные ИК-спектроскопии показывают отсутствие изменений в поверхностном слое текстильных материалов после их плазменной активации.

Таблица 1 – Изменение спектральных параметров плазмомодифицированных образцов

Полоса пропускания, $см^{-1}$	Характеристическая группа	ΔT_1, %	ΔT_3, %	ΔT_4, %	ΔT_5, %	ΔT_6, %
3335	O–H, водородные связи целлюлозы	+0,7	–3,2	–1,3	–4,9	-2,1
2896	C–H, алифатические	+3,4	–3,3	–0,9	–2,4	-1,2
1735	C=O, пектин/гемицеллюлоза	–1,8	–7,1	–10,8	–2,9	-1,0
1645	Адсорбированная влага, C=C лигнина	+4,9	–6,1	–6,3	–2,1	-4,0
1595/1505	Ароматика лигнина	+1,6/ +4,2	–4,4/ -2,7	–7,4/ -2,3	–2,0/ 0	-1,5/ -7,7
1425	Кристаллическая CH_2	0	–4,3	-2,7	–3,1	+0,3
1367	C–H, деформация кольца	+2,7	–2,4	-6,8	+1	-1,4
1245	C–O ацетил лигнина/гемицеллюлозы	–1,5	+1,5	-2,2	+1	+0,3
1160	C–O–C, гликозидный мостик	+2,6	–2,5	+4,0	+2,5	-1,4
895	Аморфная целлюлоза	–2,2	–2,3	+10,2	–5,2	-2,0
815–850	C–H, внеплоскостные	–5	-3,8	-3,3	–6,7	-0,8

Проведены исследование морфологи поверхности анализ микрофотографий, полученных методом лазерной конфокальной сканирующей микроскопии.

Проведен анализ микрофотографий текстильного материала из волокон технической конопли (образец 1, полотняное переплетение, 100% техническая конопля), полученный методом сканирующей электронной микроскопии (рисунок 3).

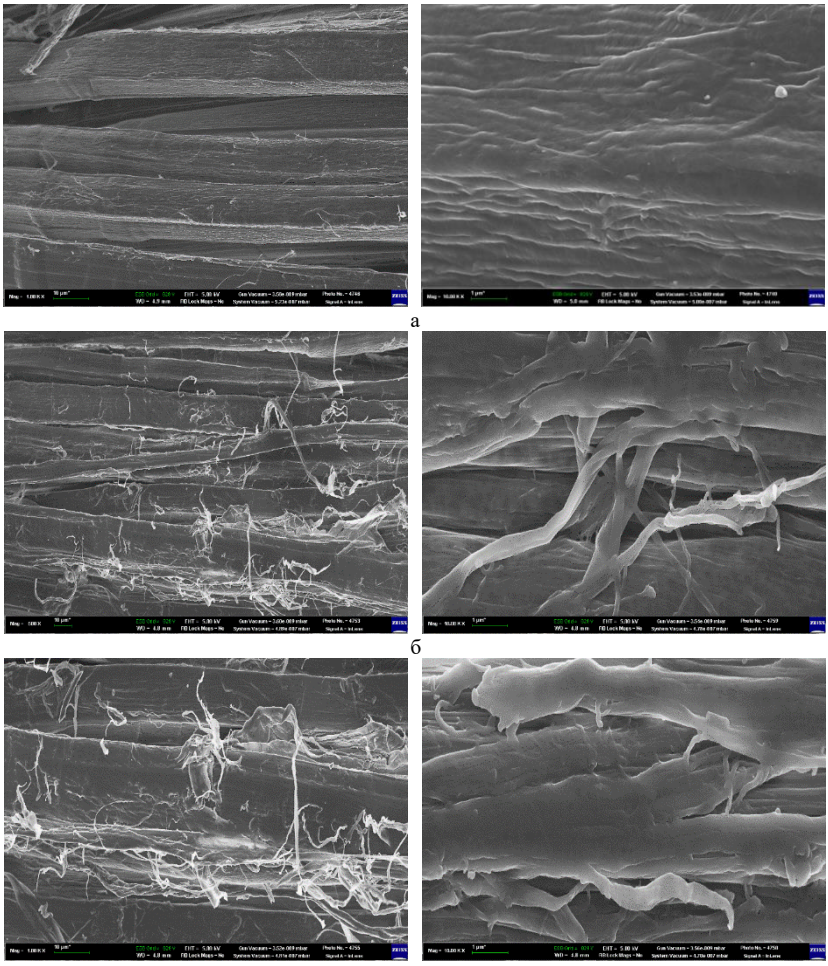


Рисунок 3 – Результаты сканирующей электронной микроскопии поверхности текстильного материала полотняного переплетения из 100% технической конопли: а – до проведения плазменной обработки, слева ×1000, справа ×10000; б – после проведения плазменной обработки в среде азота в течение 3 минут, слева ×1000, справа ×10000; в – после проведения плазменной обработки в среде азота в течение 9 минут, слева ×1000, справа ×10000

На основании анализа микрофотографий установлено, что до плазменной обработки поверхность текстиля из технической конопли характеризуется плотным расположением продольных волокон со средним поперечным размером 21 мкм. Увеличение в 10000 раз позволило выявить неоднородность морфологии этих волокон, выраженную в наличии продольных впадин. Воздействие плазмы в азотной среде на протяжении 3-9 минут приводит к существенной деструкции элементарных структур, проявляющейся в их выраженном разволокнении.

В четвертой главе разработаны технологические рекомендации по применению потока ВЧЕ-разряда пониженного давления в производстве текстиля из технической конопли, определены оптимальные режимы обработки для различных типов тканей и назначений. Обоснована экономическая эффективность производства структурированных плазмой текстильных материалов из технической конопли. Приведены сведения о необходимости разработки отечественных государственных стандартов, что призвано способствовать стимулированию выпуска данной продукции и повышению ее конкурентоспособности

Для поточного серийного производства предпочтительно использование плазменных машин с рулонной подачей материала.

Интеграция плазменной обработки в существующие технологические процессы производства текстильных материалов из технической конопли должна осуществляться с учётом следующих рекомендаций:

− плазменную обработку рекомендуем проводить на заключительном этапе отделки текстильного материала, после выполнения всех механических операций и химических обработок (стирка, отбелка, крашение), поскольку плазменное воздействие модифицирует поверхность волокна и может повлиять на результаты последующих химических процессов;

− для обеспечения непрерывности технологического процесса рекомендуется использование поточных плазменных установок с системой автоматической подачи материала через вакуумный шлюз, что позволит интегрировать плазменную обработку в непрерывную линию отделки;

− при разработке технической документации на специальную одежду из конопляного текстиля необходимо указывать режим плазменной обработки в технологической карте, включая тип плазмообразующего газа и время экспозиции, что обеспечит воспроизводимость свойств готового изделия;

− при производстве специальной одежды для различных отраслей экономики целесообразно применять дифференцированный подход к плазменной обработке различных деталей изделия: например, обработка зон повышенного механического воздействия азотом для повышения прочности, а зон, контактирующих с телом, − воздухом или азотом для обеспечения гидрофильности и комфортного микроклимата.

Проведён комплексный расчёт экономической эффективности внедрения данной технологии, включающий оценку затрат, рентабельности и сроков окупаемости производства нового вида водоотталкивающих текстильных материалов. Согласно проведенному расчету, предприятие сможет получать ежегодно

чистую прибыль в размере около 2 318 568 руб., достигая рентабельности порядка 12,3 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выявлено, что использование плазменной обработки для текстильных материалов из волокон технической конопли является перспективным направлением благодаря экологичности технологии плазменной модификации и позволяет расширить сырьевую базу получения текстильных материалов в РФ.

2. Экспериментально установлено, что обработка текстильных материалов из волокон технической конопли потоком низкотемпературной плазмы ВЧЕ-разряда пониженного давления позволяет целенаправленно изменять сорбционными и механическими свойствами путём варьирования вида плазмообразующих газов и времени экспозиции плазмы:

− Установлен максимальный прирост разрывной нагрузки до 30% вдоль петельных рядов для трикотажа со спандексом после 9-минутной обработки в среде аргона; для смесового трикотажа (55% конопли) зафиксировано увеличение на 21% вдоль петельных рядов и 33% поперек петельных рядов при обработке азотом в течение 9 минут. В ткани саржевого переплетения показатель относительной разрывной нагрузки составил 17% для основы и 31% для утка при проведении плазменной обработки в среде аргона в течение 9 минут.

− Стойкость к истиранию увеличена на 31% для смесового текстильного материала полотняного переплетения, состоящего из 55% конопли и 45% хлопка, обработанного воздушной плазмой в течение 9 минут; для ткани саржевого переплетения с содержанием с 55% конопли оптимальным оказался азот, обеспечивший 20% увеличение стойкости к истиранию; среди трикотажных материалов, трикотаж со спандексом показал максимальный прирост (22%) при обработке аргоном в течение 9 минут.

− Гигроскопичность повышена на 75% (до 19,36%) для трикотажа из 53% конопли, 44% хлопка и 3% спандекса после 9-минутной обработки азотной плазмой; для тканей из 100% конопляного волокна максимальный прирост достигнут при 9 минутах обработки аргоном (ткань полотняного переплетения – на 33%) и азотом (трикотаж – на 29%);

− Капиллярность увеличена на 72% для текстильного материала саржевого переплетения после плазменной обработки в воздушной среде в течение 9 минут.

− Экспериментально подтверждена устойчивость полученных свойств после многократных стирок: снижение показателей составляет не более 3%, что свидетельствует о долговечности достигнутого эффекта.

3. При воздействии плазмы на волокна конопли наблюдается уменьшение аморфной доли и рост упорядоченности надмолекулярной структуры целлюлозы I.

4. Установлено, что при выбранных параметрах плазменного воздействия химическая активация волокон технической конопли отсутствует, в то время

как морфологические исследования подтверждают наличие разволокнения поверхности волокна.

5. Подготовлены рекомендации по получению плазмомодифицированного текстиля из технической конопли с учетом целевого назначения. Предложена квалиметрическая методика подбора режимов плазменной обработки, адаптированная под конкретные виды материалов и требования к ним. Обоснована целесообразность разработки технических условий и стандартов серии «Ткани конопляные и смесовые» для обеспечения качества и безопасности продукции.

6. Установлено, что внедрение плазменной обработки конопляных тканей экономически выгодно: при себестоимости 920,01 руб. и оптовой цене 1058,02 руб. за метр, проект обеспечивает 12,3% рентабельности и приносит 2 318 568 руб. чистой прибыли в год.

Результаты исследований, полученные в ходе выполнения данной работы, могут быть применены при разработке новых технологий плазменной модификации лубяных волокон технической конопли для создания текстильных материалов с заданным комплексом сорбционных и механических свойств, предназначенных для производства одежды и текстильных продуктов широкого спектра применения.

Основные результаты работы изложены в следующих публикациях:

Статьи, опубликованные в научных рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. **Репина, М. В.** Повышение механических свойств волокон конопли на основе модифицирования плазмой / М. В. Репина, Э. А. Хамматова // Дизайн и технологии. - 2025. - № 110 (152). - С.28-32.

2. **Репина, М. В.** Плазменная модификация текстильных материалов с содержанием волокон конопли для повышения их гигроскопических свойств / М. В. Репина, Э. А. Хамматова // Дизайн и технологии. - 2025. - № 110 (152). - С.78-82.

3. **Репина, М. В.** Влияние плазменной обработки в среде аргона на разрывную нагрузку и стойкость к истиранию трикотажного полотна из конопляного волокна: структурное обоснование по данным рентгенофазового анализа и ИК-Фурье спектроскопии / М. В. Репина, Э. А. Хамматова // Костюмология. - 2026. - Т 11. - №3. - URL: https://kostumologiya.ru/PDF/17TLKL326.pdf.

Статьи в сборниках научных трудов и материалов конференций:

1. **Репина, М. В.** Модификация физико-механических свойств конопляного текстильного материала плазменной обработкой конопли / М. В. Репина, Э. А. Хамматова // Инновационные текстильные технологии. Перспективы развития: Тезисы докладов по материалам VI Всероссийской научной студенческой конференции с международным участием. - Москва. - 2025. - С. 56.

2. **Репина, М. В.** Производство текстиля из технической конопли / М. В. Репина, Э. А. Хамматова // Традиции и инновационные процессы в индустрии моды: Сборник научных статей по материалам Всероссийской научно-практической конференции. Уфа. - 2025. - С. 100-102.

3. **Репина, М. В.** Перспективы использования плазменной обработки для направленного улучшения свойств текстильных материалов из технической конопли / М. В. Репина, Э. А. Хамматова // Актуальные аспекты развития науки и общества в эпоху цифровой трансформации: Сборник материалов XXXI Международной научно-практической конференции. - Москва. - 2026. - С. 112-116.

4. **Репина, М. В.** Влияние кратковременной плазменной обработки в среде азота на текстильный материал из технической конопли / М. В. Репина, Э. А. Хамматова // Современные исследования: теория, практика, результаты: Сборник материалов XXVII Международной научно-практической конференции. - Москва. - 2026. - С. 134-137.

5. **Репина, М. В.** Влияние низкотемпературной плазменной обработки на сорбционные свойства и структуру текстильного материала из технической конопли / М. В. Репина, Э. А. Хамматова // Science and modernity: материалы XIV Международной научно-практической конференции. - Москва. - 2026. - С. 30-36.

6. **Репина, М. В.** Влияние низкотемпературной плазменной обработки на сорбционные свойства и структуру текстильного материала из технической конопли / М. В. Репина, Э. А. Хамматова // Science and modernity: материалы XIV Международной научно-практической конференции. -Москва. - 2026. - С. 30-36.

7. **Репина, М. В.** Влияние низкотемпературной плазменной обработки на прочностные свойства текстильного материала из технической конопли / М. В. Репина, Э. А. Хамматова // Устойчивое развитие общества: новые научные подходы и исследования: сборник научных трудов по материалам XXXII Международной научно-практической конференции. - Москва. - 2026. - С. 112-116.

8. **Репина, М. В.** Формирование нормативно-технической базы для текстильных материалов из технической конопли: проблемы стандартизации и перспективы развития / М. В. Репина, Э. А. Хамматова // Устойчивое развитие общества: новые научные подходы и исследования: сборник научных трудов по материалам XXXII Международной научно-практической конференции. - Москва. - 2026. - С. 104-107.

9. **Репина, М. В.** Влияние плазменной обработки в воздушной среде на текстильный материал из технической конопли / М. В. Репина, Э. А. Хамматова // Актуальные научные исследования: сборник статей XXXV Международной научно-практической конференции. - Пенза. - 2026. - С.37-39.

Заказ Тираж 100 экз.

Офсетная лаборатория КНИТУ 420015 г. Казань, ул. К. Маркса, 68